



TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Ilkka Alhonsalo

Litiumakkujen syklitestausjärjestelmä

Diplomityö

Tarkastaja: professori Teuvo Suntio
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan
tiedekuntaneuvoston
kokouksessa 5.9.2012

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

ALHONSALO, ILKKA:Litiumakkujen syklitestausjärjestelmä

Diplomityö, 58 sivua, 0 liitesivua

5-9-2012

Pääaine: Tehoelektroniikka

Tarkastaja: Teuvo Suntio

Avainsanat: Akut, Litiumakut, Akkujen syklikestävyuden mittaaminen

Akkutekniikan kehitys on mahdollistanut akkujen käyttämisen suuritehoisissa kannettavissa laitteissa. Akkujen uudesta käyttökohteesta johtuen, aiempaa kokemusta akkujen luotettavuudesta ei kuitenkaan ole. Lisäksi hintapaineet pakottavat käyttämään ennen tuntemattomia toimittajia, joiden laadusta ja luotettavuudesta ei ole aiempaa kokemusta.

Tässä työssä tutkittiin 6:n kiinalaisen litiumakkuvalmistajan akkujen luotettavuutta hitsauskonekäyttöä simuloivassa kuormitustestissä. Testin tavoitteena oli selvittää akkujen odotettavissa oleva elinikä lopullisessa sovelluksessa ja selvittää tekijöitä, jotka vaikuttavat akkujen elinikään, tai ennustavat vanhenemista.

Työ koostuu kolmesta pääosasta. Ensiksi potentiaaliset akkuvalmistajat etsittiin internetistä, ja sähköpostikirjeenvaihdon jälkeen valittiin yhtiöt, joiden ratkaisut näyttivät paperilla parhaimmilta.

Seuraavaksi akkujen testaamisen tarvittava automaattinen järjestelmä suunniteltiin ja rakennettiin. Testejä ajettiin syyskuusta maaliskuuhun. Testeissä akkuvalmistajien välillä ilmeni selkeitä eroja. Parhaat akut kestivät yli 1000 latauspurkaus sykliä, kun taas osa akuista oli testin alussa hieman kyseenalaisessa kunnossa. Tietyissä mittajärjestelmän osissa olleet lämpötila-anturit eivät toimineet. Tämän vuoksi lämpötilan vaikutuksen arviointi akkujen vanhenemiseen ei ole kovin luotettavaa. Lisäksi akkuja testattiin ulkona eri vuodenaikoina, joten akut myös altistuivat eri lämpötiloille. Akkujen eliniät ovat silti vertailukelpoisia, sillä suurin osa akuista testattiin samaan aikaan keskenään. Mitään selkeää akkujen elinikää ennustavaa tekijää ei testin aikana ilmennyt. Monessa tapauksessa akkujen kuntoa kuvaava parametri, näyttää mittausten perusteella olevan akun sisäinen resistanssi.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Electrical Engineering

ALHONSALO, ILKKA: Cycle testing system for lithium batteries

Masters thesis, 58 pages, 0 appended pages

5-9-2012

Major subject: Power electronics

Examiner: Teuvo Suntio

Keywords: Batteries, Lithium batteries, Measuring battery cycle endurance

The development of battery technology has enabled the use of batteries in high power portable applications. However because the application field is new, there is no previous experience of the reliability of the batteries. Also the price constraints force, the use of previously unknown suppliers. In this thesis the reliability of lithium batteries from 6 different chinese battery manufacturers was researched. Batteries were run through a test that simulated expected loading in welding machine application. Purpose of the test was to find out expected lifetime in the end use application and to see if there are any parameters that predict which batteries are good and which are not, and if there are any factors that affect the lifetime.

There were three major phases in this work. First suitable manufacturers were searched from the internet. They were contacted, and those with most promising products were chosen.

Next the necessary test system was designed and built. Battery tests were ran from september to march. Tests showed that there were clear differences between different manufacturers. Best samples lasted for over 1000 charge-discharge cycles, and the worst ones were bit sketchy from the start. During the tests no obvious parameters, that would have predicted the battery lifetime were found. Common knowledge is that temperature affects the battery lifetime. However because of malfunctioning temperature sensors and varying ambient temperatures this effect was not observed. However most of the batteries were affected to the same ambient temperatures so that did not create the differences observed in the lifetime. Based on the test results one parameter that can be used to estimate general shape of the aged battery is battery's internal resistance.

ALKUSANAT

Haluan kiittää Kemppi Oy:tä mahdollisuudesta tämän diplomityön tekemiseen. Työn tekeminen on ollut monella eri tavalla opettava kokemus. Kempin henkilöstöstä haluan kiittää Petri Korhosta ja Rauno Turusta, ilman heidän apuaan onnistuminen olisi ollut huomattavasti vaikeampaa.

SISÄLLYS

1. Johdanto	1
2. Lähtötilanne	3
2.1 Testattavat akut	4
2.2 Akkujen valmistajat	5
2.3 Akkujen valintaperusteet	7
3. Koejärjestelyt	8
3.1 Mittaukset	8
3.2 Syklaysparametrit	9
3.3 Testausjärjestelmä	12
3.4 Mittausyksikön rakenne	12
3.5 Latauselektroniikka	14
3.5.1 Akun mallintaminen laturin kuormana	14
3.6 Mittauselektroniikka	24
3.7 Kuorma	28
3.8 Ohjausyksikkö	29
3.9 Tietoliikenne	31
3.9.1 MAX11068 tietoliikenne	32
3.9.2 Lämpömittarien tietoliikenne	33
3.10 Ohjausyksikön ohjelma	34
4. Tulokset	37
4.1 Mittaustulokset	37
4.1.1 Yhteenveto mittaustuloksista	48
5. Loppupäätelmät	50
Lähteet	51

TERMIT JA SYMBOLIT

V_{an}	Testikortin analogielektroniikan syöttöjännite noin 13 V
V_{pow}	hakkurin syöttöjännite 40 V
V_{bat}	Akun napajännite vaihtelee välillä 15 – 21,9 V LiFePo4 kemialla ja 18 – 25,2 V LiPo kemialla
L_{sw}	Hakkurin primääriinduktanssi
T_{off}	Vakio aika jonka hakkurin ulostulo on alhaalla
CC-CV	constant current constant voltage - vakiovirta vakiojännite lataus
CMRR	common mode rejection ratio
xSyP	x määrä y:n kennon rinnankytkentää kytkettynä sarjaan
C_{ah}	Akun tai kennon kapasiteetti ampeeri tunteina
t_{mv}	Akun arvojen perästäisten mittauksen välinen aika
SOC	state of charge - akun tai kennon varaustila
Syklitysrutiini 1	30 s kuormitusta 10 s taukoa kaikkien akkujen kuormana 450 mΩ
Syklitysrutiini 2	30 s kuormitusta 180 s taukoa osalla akuista kuormana 275 mΩ

1. JOHDANTO

Nykyinen akkutekniikka mahdollistaa lukuisia sovelluksia, jotka eivät ole ennen olleet mahdollisia. Akkujen teho- ja energiatiheuden kasvun ansiosta esimerkiksi akkukäyttöiset moottorisahat ja sirkkelit ovat mahdollisia. Tämä kehitys on ollut mahdollista litiumioniakkujen ansiosta. Litium-tekniikkaan perustuvat akut pystyvät varaan enemmän energiaa ja antamaan enemmän tehoa painoyksikköä kohden kuin muut yleisesti käytössä olevat akut. Esimerkiksi NiMh akkuun verrattuna litium akku pystyy säilömään 380% enemmän energiaa ja antamaan 1800% enemmän tehoa painoyksikköä kohden [2].

Kemppi Oy, joka on tunnettu hitsauskoneiden valmistajana, on pohtinut mahdollisuutta akkukäyttöisen hitsauskoneen markkinoille tuomiseen. Eräs tämän tuotekehitysprojektin haastavimpia osa-alueita on sopivien akkujen valinta hitsauskoneeseen.

Hitsaaminen vaatii melko suurta tehoa, tyypillisesti $2,4 - 4,2 \text{ kW}$. Toisaalta vaadittu energiamäärä ei ole kovin suuri. Tyypillisessä hitsaustilanteessa kaarijännite on noin 30 V ja hitsausvirta 80 A ja yhden hitsauspuikon polttaminen kestää suunnilleen 30 sekuntia. Näillä arvoilla yhden hitsauspuikon polttaminen vaatii 20 Wh energiaa. Linjauksena on että koneella tulisi pystyä hitsaamaan 12 hitsauspuikkoa. Akun energiamäärän tulisi siis olla noin 250 Wh. Akun pieni koko suhteessa suureen tehoon asettaa akkujen tehotiheydelle tiukat vaatimukset.

Yleisesti litiumpolymeeriakut menettävät 20% kapasiteetistaan 500 lataus-purkaus syklin aikana[2]. Lämpötila vaikuttaa kuitenkin voimakkaasti akkujen vanhenemisnopeuteen ja onkin tavallista, että akut joita käytetään suurimmalla sallitulla teholla, ja jotka kuumenevat purkuvirran ja sisäisen resistanssin aiheuttamien tehohäviöiden takia, vanhenevat huomattavasti nopeammin kuin pienemmällä teholla puretut akut. Maksimiteholla puretut akut saattavat menettää 20% kapasiteetistaan jo 50 lataus-purkusyklin aikana.

Акun odotettavissa oleva elinikä ilmoitetaan yleensä vain 1 C:n purkuvirralla syklitetylle akulle ja toisinaan maksimiteholla syklitetylle akulle. Tämä ei anna riittävästi tietoa akun eliniästä Kempin loppusovelluksessa joten, akkujen parametrit pitää mitata itse. Tämä on tämän diplomityön päämotivaatio.

Suurin kiinnostuksen kohde on akkujen käyttökelpoinen elinikä normaalia hitsauskonekäyttöä vastaavissa olosuhteissa. Koska akkukäyttöisiä hitsauskoneita ei ole

markkinoilla, ja akkujen datalehdillä ei useinkaan ole tarvittavaa tietoa, on akkujen kapasiteetin pieneneminen mitattava itse.

Hitsauskoneen hintapaineet määräävät sen, että myös akkujen hinnan pitää olla mahdollisimman alhainen. Käytännössä tämä tarkoittaa kiinalaisiin toimittajiin turvautumista. Kiinalaisten akkutoimittajien asiantuntevuus ja luotettavuus ovat vaihtelevia. Projektin alkuselvitystä tehdessä ja tarjouspyyntöjä kysellessä, kävi selväksi että monien ehdotettujen tuotteiden ominaisuudet eivät vastanneet tarjouspyynnössä määriteltyjä ominaisuuksia. Kun puutteista huomautettiin, osa toimittajista ilmoitti, että kyseessä on virhe, ja että oikeat arvot ovat ilmoitettuja paremmat.

Akuille tarvitsee myös suorittaa vastaanottotarkastus, jotta akkujen ominaisuudet tiedetään, ja jotta mahdolliset muutokset laadussa huomataan ajoissa.

Akkujen mittaaminen käsin ei ole mielekästä sillä yksi lataus-purkaus sykli kestää 1C:n latausvirralla noin tunnin. Vanhenemisilmiöiden mittaamiseksi akkuja täytyy käyttää vähintään kymmeniä ja ehkä satoja syklejä. Koska mittaukset pitää lisäksi tehdä 20 – 30 akulle, olisi työmäärä suuri. Automaattinen järjestelmä pystyy tekemään mittauksia jatkuvasti yöllä ja viikonloppuisin jolloin mittaukset valmistuvat nopeammin.

Kempillä ei ole akkukäyttöisiä laitteista aiempaa kokemusta, niinpä akkutestin aikana myös varmistetaan että tietyt itsestään selvänä pidetyt oletukset litiumakuista myös pitävät paikkansa, eivätkä ole vain toiveajattelua. Akkujen testaamista varten kehitetty elektroniikka ja sulautetut ohjelmistot ovat myös hyvä pohja, jonka perusteella varsinaisen akkuhitsauskoneen akunhallintaelektroniikkaa voidaan alkaa kehittämään.

Työn tavoitteena on kehittää automaattinen mittausjärjestelmä, joka syklittää akkuja lataamalla ja purkamalla niitä. Järjestelmän tulee pystyä syklittämään ainakin LiPo ja LiFePo₄ kemiaan perustuvia akkuja. Akkujen purkuteho vastaa hitsaamisessa tarvittavaa tehoa.

Syklityksen aikana akun kennojen jännitteet ja virta mitataan ja tallennetaan tietokoneelle myöhempää analysointia varten. Järjestelmän tulee olla skaalautuva, jotta monen akun tiedot voidaan kerätä samalla testikerralla.

Mitatun datan perusteella vertaillaan eri akkukemioihin perustuvia akkuja ja eri akkuvalmistajien akkumalleja ja valitaan sopivimmat kandidaatit hitsauskoneen prototyyppiin.

2. LÄHTÖTILANNE

Modulaarisen ja skaalautuvan rakenteen aikaansaamiseksi, järjestelmän täytyy koostua itsenäisistä yksiköistä, jotka pystyvät suoriutumaan akkujen testaamisessa tarvittavista tehtävistä (lataus, purku, mittaus). Akun lataaminen vaatii kohtalaista tehoa riippuen akun koosta, sarjaankytkettyjen kennojen määrästä ja latausnopeudesta. Lisäksi jokaista akkua pitää ladata eri tavalla akun varaustilasta ja kemiasta riippuen. Alhaisessa varaustilassa akkua pitää ladata vakiovirralla ja lopuksi vakiojännitteellä varaustilan ollessa korkea. Lisäksi LiPo ja LiFePo4 akkujen kennojännitteet eroavat toisistaan.

Nästä syistä johtuen kaikkia akkuja ei voi ladata yhdellä tehonlähteellä, vaan jokainen akku vaatii oman laturinsa. Akun lataaminen järkevässä ajassa vaatii suhteellisen suurta tehoa, joten helppo lineaarinen tehonlähde ei tule kysymykseen, vaan on käytettävä hakkuria. Hakkurin suunnittelussa on otettava huomioon Akun ominaisuudet kuormana, latausvirran rajoittaminen ja latauksen loppujännitteen tarkka säätäminen. Lisäksi asetusravot eivät saa muuttua ympäristöolosuhteiden muuttuessa.

Акun purkuvaiheessa akun energia on hävitettävä jonnekin, energianielun pitää kyetä kestämaan 4,2 kW:n teho, jos testi ajetaan täysikokoisilla akuilla. Myös kytkin, jolla kuorma kytketään, joutuu kytkemään täyden kuormavirran 40 – 80 A, joten tämän kytkimen tehonkestoon ja tehohäviöihin on syytä kiinnittää huomiota.

Акun kennojen balansoimiseksi ja balansointitarpeen arvioimiseksi jokaisen kennon kennojännite pitää mitata. Tyypillisesti kennot ladataan 50 mV:n päähän kennojen maksimijännitteestä, joten kennojännite tulisi saada mitattua tätä paremmalla tarkkuudella. Kennojännitteen mittaamista, etenkin ylemmissä kennoissa, vaikeuttaa alempien kennojen aiheuttama suuri yhteismuotoinen jännite. Esimerkiksi jos kennon jännite halutaan tietää 5 mV:n tarkkuudella, pitää viidennen kennon jännitettä mitatessa mittaussytkennän CMRR:n olla vähintään 72 dB.

Myös elektroniikka jolla akun virtaa mitataan kohtaa haasteita. 250 Wh:n akun tyhjentäminen 4,2 kW:lla vastaa noin 17 C:n virtaa. Toisaalta akkua ladataan yleensä virralla jonka suuruusluokka on 1 C. Jos mittauselektroniikka mitoitetaan suurta purkuvirtaa ajatellen, on mittauksen resoluutio latauksen tapauksessa helposti liian karkea ja virheet liian suuria. Toisaalta taas pienelle latausvirralle mitoitettun mittausjärjestelmän mitta-alue ja tehonkesto loppuvat kesken, kun järjestelmä siirtyy

purkuvaiheeseen.

Litiumakuilla on vaarallisen tekniikan maine. Väärin ladatut akut voivat mahdollisesti syttyä tuleen. Lisäksi akun purkaminen liian tyhjäksi, ylilataaminen, tai lämpötilaan nähden liian suurella virralla lataaminen voivat vahingoittaa akkua jolloin se muuttuu epästabiiliksi ja vaaralliseksi[2]. Lisäksi purkuvaiheessa esiintyvät suuret tehot voivat kuumentaa energianieluna käytetyn vastuksen erittäin kuumaksi. Koska testin on tarkoitus jatkaa myös öisin ja viikonloppuisin, ilman valvontaa, korostuu näiden seikkojen tärkeys entisestään. Testaaminen on siis käytännössä tehtävä, joko ulkona, tai tulenkestävässä tilassa.

Jos tulenkestävää tilaa ei löydy ja testaus tehdään ulkotiloissa, tuo ympäristö kuvaan uusia haasteita. Laitteiston on kestävä ainakin jossain määrin kosteutta ja lämpötilan vaihteluita. Toisaalta lämpötilanvaihtelut antavat myös mahdollisuuden tutustua akkujen käyttäytymiseen eri lämpötiloissa. Myös akkujen latausvirran lämpötilarajoihin on kiinnitettävä huomiota. Huoneen lämmössä useimpia akkuja voi ladata 1 C:n virralla, alle 0 °C lämmössä lataus pitää lopettaa, ja osa valmistajista suosittelee, että matalissa lämpötiloissa (kuitenkin 0 °C yläpuolella) olisi suotavaa että akkuja ei ladattaisi täydellä 1 C:n virralla.

Akkujen pitäisi kestää noin 500 lataus-purku sykliä. Jos akkuja ladataan 1 C:n virralla ja purkuvaihe kestää vaikkapa 10 minuuttia kuluu testin ajamiseen aikaa 24 vuorokautta olettaen että testiä pystytään ajamaan keskeytyksittä. Mittausten pitkästä ajallisesta kestosta ja testipaikan sijainnista johtuen järjestelmän tulee olla luotettava. Jos Järjestelmää valvova ohjelma lopettaa toimintansa perjantai-iltana, ja järjestelmä resetoidaan maanantaiaamuna menee mittausaikaa hukkaan pahimmassa tapauksessa 64 tuntia. Lisäksi akut voivat pahimmassa tapauksessa vahingoittua peruuttamattomasti, jos akun purkutila jää päälle tai jos, esimerkiksi ohjelmointivirheiden vuoksi, akkua ei balansoida latauksen aikana. Balansoinnin epäonnistuminen saattaa myös huonontaa akkuja pikkuhiljaa, jolloin muuten hyvät ja kestävät akut vaikuttavat huonommilta kuin ne oikeasti olisivat.

Elektroniikan lisäksi huomattava osa järjestelmän tekemiseen kuluva työstä kuluu ohjelmistojen kirjoittamiseen. Kymmenien testikorttien hallinta samanaikaisesti, tietoliikenteen hallinta virhe- korjauksineen ja tarkistuksineen sekä protokollien opettelu ja datan tallennus, hallinta ja käsittely tulevat olemaan suuressa osassa.

2.1 Testattavat akut

Akkutesteissä päätettiin käyttää 4 – 5 Ah:n 6S akkuja. Tämä päätös tehtiin siksi, koska Täysikokoisten akkujen (18S 4,5 Ah) käyttäminen olisi johtanut moniin käytännön ongelmiin. Ensinnäkin hyvin harvoilla valmistajilla oli tarjota 18S 4,5 Ah akkuja suoraan varastosta. 18S akut olisi pitänyt rakentaa erikseen mikä olisi johtanut lisäkustannuksiin ja pitkiin odotusaikoihin. Lisäksi suurten akkujen lento-

rahtauksessa on rajoituksia. Akun koon pienentäminen yhteen kolmasosaan täysikokoisen laitteen akusta helpottaa myös laitesuunnittelua huomattavasti. 6S akku vaatii kemiasta riippuen laturin joka kykenee $21,9 - 25,2 \text{ V}$ jännitteeseen, kun taas 18S akkua pitäisi ladata $65,7 - 75,6 \text{ V}$ jännitteellä. Pienemmällä jännitteellä toimivan laturin rakentaminen onnistuu hyllystä saatavilla peruskomponenteilla ilman seinäjännitteen käyttämistä. Suurempi jännitteisen ja tehoisen laturin suunnittelu ja rakentaminen olisi ollut vaikeampaa. Pienempi testiakku yksinkertaistaa myös kuormavastuksen valintaa, koska yksinkertainen vastuslankakierukka riittää imemään tarvittavan virran akusta.

Huonona puolena 6S akkujen käyttämisessä 18S akkujen sijaan on se että, että tilanne ei luonnollisestikaan vastaa aivan loppukäytön tilannetta, vaikka jokaisen kennon kuormavirta onkin sama kuin suunnitellussa hitsauskoneessa. Suurimpana puutteena on akun erilainen lämpödynamiikka. 6S akussa akun keskeltä on keskimäärin lyhyempi matka reunoille kuin 18S akussa. Tästä johtuen lämpöresistanssi akun keskeltä akun reunoille on 18S akussa suurempi ja sen keskimmaiset kennot käyvät lämpimämpinä kuin 6S akun tapauksessa, jolloin keskimmaisten kennojen elinikä on oletetusti lyhyempi.

2.2 Akkujen valmistajat

Akkujen valmistajat löytyivät pääosin selaamalla litiumakkutarjontaa seuraavissa web portaaleissa: madeinchina.com, alibaba.com ja globalsources.com[3]. Lisäksi foorumeita selatessa muutaman lupaavan valmistajan nimi nousi esiin. Valmistajiin otettiin yhteyttä sähköpostilla ja kysyttiin mielipidettä ja tarjouspyyntöä 4,5 Ah 18S akusta joka pystyisi 20 C:n purkuvirtaan ja kestäisi 500 sykliä.

Monen valmistajan kohdalla turhautumista aiheutti myynnin selkeä asiantuntemattomuus, esimerkiksi kennon sisäinen resistanssi tuntui olevan monessa paikassa täysin tuntematon käsite. Myös akkujen ominaisuuksien määrittely oli monen valmistajan kohdalla löysää ja koostui kysymyksistä: "mikä kapasiteetti, kuinka suuri jännite". Lisäksi akkujen mukaan tyrkytettiin väkisin suojapiirejä, jotka monessa tapauksessa olisivat estäneet akkujen toiminnan halutulla tehoalueella.

Aikaisemmassa tutkimuksessa[1] todettiin, että LiFePo_4 akut soveltuisivat parhaiten akkukäyttöisen hitsauskoneen energiavarastoksi. Hyvien ja loppusovelluksissa oikeasti toimivien LiFePo_4 kennojen saatavuus on kuitenkin surkeaa. Lupaavinta LiFePo_4 vaihtoehtoa A123:n ANR26650 ei onnistuttu saamaan testeihin, eikä sähköpostiyhteyttä valmistajaan.

Yleisesti LiFePo_4 kennojen sisäinen resistanssi oli $10 - 30 \text{ m}\Omega$ kennoa kohden, joka on liian paljon. Suurin osa LiFePo_4 akuista oli selkeästi tarkoitettu sähköautojen tai sähkömopojen voimanlähteeksi. Nämä sovellukset ovat kempin sovellukseen verrattuna hyvin erilaisia, sillä niissä akun purkaminen kestää muutamia tunteja eli

Taulukko 2.1: Testeihin valittujen akkujen tiedot

Valmistaja	Tyyppi	Ah	C-luku	mΩ	€	kennotyyppi
Fullymax	LiPo	4,5	35	2,2	7,70	FB8244152XP
Sanyan Energy	LiPo	5	30	x	10,09	SY1044125SXX
Shida battery Technology	LiPo	4,5	25	3	5,90	8043150HP
Shida battery Technology	LiPo	5	25	3	6,70	CEL1044129D
General electronics battery	LiFePo4	4,5	33	3	14,18	LF9550150SH33C
Microvast	LiFePo4	1,1	30	10	1,63	MV18650FP1-1
Everwin technology	LiPo	4,4	55	x	11,93	8544152XT
Everwin technology	LiPo	4,25	25	x	7,51	8443129HP
Collection Power Sources	LiPo	4,5	25	4	7,64	8043150SP
Kokam	LiPo	4,8	20	x	27,97	SLPB11043140H4

purkuvirrat ovat pienempiä kuin 1 C. Hitsauskoneessa akku purkautuu maksimitehoa käytettäessä muutamassa minuutissa, ja purkuvirrat ovat järkevän kapasiteetin omaavalla akulla 10 – 20 C:n luokkaa. Vaatimukset täyttäviä LiFePo4 kennoja löytyikin vain kahdelta valmistajalta.

Taulukkoon 2.1 on koottu lyhyt yhteenveto testeihin valittujen akkujen ominaisuuksista. Taulukossa on ilmoitettu akkujen valmistaja, akkukemian tyyppi, kapasiteetti, suurin sallittu jatkuva purkuvirta, sisäinen resistanssi, kennon hinta 1000 kappaleen erissä ja valmistajan kennokoodi. Vain Microvast ja General electronics battery pystyivät tarjoamaan ominaisuuksiltaan tyydyttäviä LiFePo4 akkuja.

Microvastin akut ovat perinteisiä 18650 tyyppisiä metallisylintereitä. Muihin akkuihin vertailukelpoinen yksikkö saadaan kytkemällä näitä kennoja 4kpl rinnakkain. General electronics battery oli ainoa valmistaja, joka pystyi tarjoamaan polymeerityyppistä LiFePo4 akkua tarpeeksi korkeilla purkuvirroilla.

Tieto sisäisestä resistanssista puuttuu monen akun kohdalla. Taulukossa tätä on merkitty x-kirjaimella. Koska MV18650FP1-1 kennoa käytetään 6S4P konfiguraatiossa efektiivinen kennoresistanssi ei ole 10 mΩ vaan neljäsosa tästä eli 2,5 mΩ

Kokam on hieman tunnetumpi korealainen akkuvalmistaja. Kokamin akkujen on tarkoitus toimia vertailukohtana kiinalaisille akuille.

2.3 Akkujen valintaperusteet

Akkuja valitessa tärkeimmät parametrit olivat sisäinen resistanssi, maksimipurkuvirta ja hinta. Jos tietoa sisäisestä resistanssista ei saatu, mutta akku ja valmistaja vaikuttivat muuten lupaavalta, tehtiin valinta C-luvun perusteella. Oletuksena on, että jos 4,5 Ah:n akun purkuvirraksi on merkitty 35 C, myös sen sisäinen resistanssi on sellainen, että akku pystyy toimimaan 157 A:n purkuvirralla. Tosin eräs valmistaja tarjosi 50 C akkuja joiden sisäinen resistanssi on $3\text{ m}\Omega$. Akun purkuvirran huomioon ottaen kyseinen resistanssilukema on epäilyttävän suuri. Erityisesti se on suurempi kuin esimerkiksi FB8244152-kennon sisäresistanssi, joka kestää vain 35 C:n purkuvirran. On mahdollista, että kyseinen akku kestää paremmin lämpöä kuin FB8244152-kenno, tai sitten kyseisen kennon elinikä maksimipurkuvirralla on huomattavasti vähemmän kuin FB8244152:n elinikä omalla maksimipurkuvirrallaan. Jos asia on näin, silloin nämä kaksi maksimipurkuvirtaa eivät ole keskenään vertailukelpoisia.

Tutkittavien akkujen pitää koostua sellaisista kennoista joista on ainakin teoriassa mahdollista rakentaa hitsauskoneeseen soveltuva akku.

Hitsauskoneen hakkuritehonlähteen kannalta on suotavaa, että akun napajännite olisi noin 60 V, kaarijännitteen ollessa 30 V. Hitsauskoneen hakkuri käy tällöin 50% pulssisuhteella, ja kuormavirta jakautuu tasaisesti tehokomponenttien kesken.

Maksimiteholla akun kuormavirta on 60 – 80 A. Jos kennon sisäinen resistanssi on vaikkapa $5\text{ m}\Omega$ tulee kennoa kohden 0,4 V jännitehäviötä. Tämä 12% LiFe-Po4 kennon nimellisjännitteestä ja 11% LiPo kennon nimellisjännitteestä. Eli akun hyötysuhde on vielä lähes 90% häviöteho on kuitenkin 32 W kennoa kohden, joka on melko paljon. Jos kennomateriaalin ominaislämpökapasiteetti on esimerkiksi $1\text{ kJ}/(\text{kg} \times ^\circ\text{C})$ [4] lämpenee 115 g painoinen kenno 30 sekunnin aikana, joka menee yhden hitsauspuikon polttamiseen, $8,3\text{ }^\circ\text{C}$. Hitsauspuikon vaihtaminen kestää noin 10 s, jona aikana akku ei oleellisesti ehdi jäähtymään. Jos akku käytetään tyhjäksi maksimiteholla, tyhjeneminen kestää $80\text{ A}/4,5\text{ Ah} \times 60\text{ min/h} = 3,4\text{ min}$. kenno lämpenee tänä aikana $32\text{ W}/115\text{ J}/^\circ\text{C} \times 60\text{ s} \times 3,4 = 56,8\text{ }^\circ\text{C}$. Jos akun lämpötila purkamisen alussa oli $25\text{ }^\circ\text{C}$ on lämpötila purun lopussa $81,8\text{ }^\circ\text{C}$, joka vahingoittaa akkua ja lyhentää akun elinikää.

Oletuksena on, että akun käyttäminen tyhjäksi maksimiteholla on harvinainen tilanne. Akun ylikuumentumiselta voidaan suojautua mittaamalla akun lämpötilaa, estämällä akun purku ja ohjeistamalla käyttäjää pitämään tauko, jos akku uhkaa ylikuumentua.

Tämän tarkastelun perusteella päätettiin, että kennot joiden sisäinen resistanssi on yli $5\text{ m}\Omega$, eivät sovellu hitsauskoneeseen ja niiden tutkimisesta ei ole hyötyä. Tästä syystä testeihin valittiin vain akkuja, joiden sisäresistanssi on alle $5\text{ m}\Omega$.

3. KOEJÄRJESTELYT

3.1 Mittaukset

Ainoa asia mitä akuista ei voida mitata kätevästi suoraan on akkujen syklikestävyys. Alkukapasiteetti, purkamisen aikainen lämpenemä ja kennojännitteiden pysyminen tasapainossa voidaan mitata jo yhdestä purkusyklistä. Kennon sisäinen resistanssi voidaan laskea kennojännitiedatasta, kun akun virta ja erityisesti virran muutokset tiedetään.

Akun vanhenemisen tutkimiseksi akut ladataan täyteen ja puretaan tämän jälkeen purkuvirralla joka vastaa hitsaustilannetta kunnes jokin akun kennoista saavuttaa minimijänniterajan jolloin purku katkaistaan ja lataus alkaa uudestaan. Akkujen latausvirta ja purkuvirta mitataan vakioväliajoin ja akun kapasiteetti saadaan laskettua kaavasta 3.1.

$$C_{ah} = \sum_{i=alku}^{loppu} \frac{I_{akku_i} \times t_{mv}}{3600} \quad (3.1)$$

Kaavassa mitatut akkuvirran arvot kerrotaan mittausaikavälin t_{mv} kanssa ja mitaustulokset latauksen alun ja latauksen lopun väliltä summataan yhteen. Tuloksena on akkuun varastoitunut varaus ampeerisekunteinä, ampeerisekunnit muutetaan ampeeritunneiksi jakamalla ampeerisekunnit 3600:lla. Tulos voidaan tarkistaa toistamalla sama analyysi mitatuille virranarvoille akun purkamisen aikana, jolloin tuloksen pitäisi olla sama. Erisuuret varaukset akkua ladatessa ja purkaessa voivat tarkoittaa, että akun kennojen sisällä esiintyy huomattavia vuotovirtoja tai tapahtuu pysyviä kemiallisia muutoksia.

Yhden hitsauspuikon polttaminen kestää normaalissa tilanteessa 30 s, joten akun purkamisen aikana akkua kuormitetaan 30 s jaksoissa, joiden välillä pidetään 10 s tauko. Virran pulssittaminen mahdollistaa akun sisäresistanssin mittauksen myös muina hetkinä kuin purkusyklin alussa ja lopussa. Resistanssi saadaan laskettua normaalisti ohmin laista:

$$R_i = \frac{\Delta U}{\Delta I_{akku}} \quad (3.2)$$

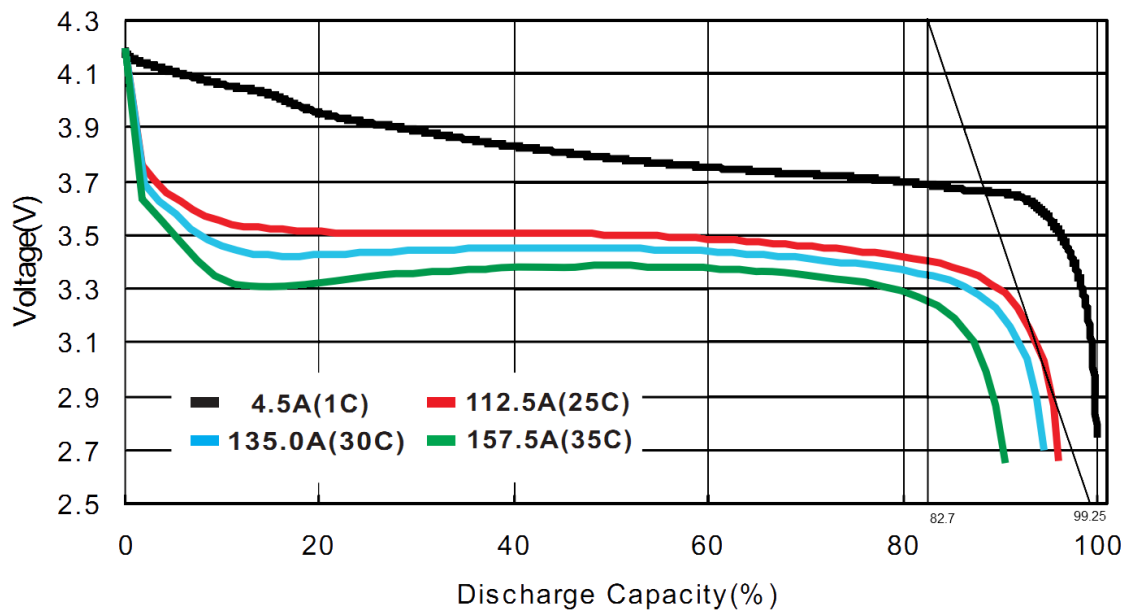
Kennojen varaustilaa arvioidaan niiden jännitteen perusteella. Lisäksi kennojen balansointi suoritetaan tämän jännitetiedon perusteella.

Akkujen lämpötilan mittaaminen mahdollistaa tulosten paremman analysoinnin. Kiinnostavaa on, onko akkujen lämpenemällä purkutilanteessa kuinka vahva yhteys akkujen elinikään ja syklikestävytyteen, ja kuinka suuri akkujen lämpenemä kahdessa eri käyttötilanteessa ylittää on.

Lisäksi lämpötilan mittaaminen mahdollistaa akun lämpötilarajojen vahtimisen, akun lataaminen tarvitsee keskeyttää jos akun lämpötila putoaa 0 °C:n alapuolelle. Koska testijärjestelmä sijaitsee ulkona on tämäkin mahdollisuus otettava huomioon.

3.2 Syklaysparametrit

Akun tyhjentyessä napajännite alkaa laskemaan hyvin nopeasti. Järjestelmän näytteistystaajuuden tulee olla tarpeeksi nopea, jotta kennojännitteen lasku alajännite-rajalle huomataan ennenkuin jännite putoaa niin alhaalle, että kenno vahingoittuu. Esimerkiksi FB8244152XP kennon 25 °C:n purkukäyrästä, joka on esitetty kuvassa 3.1 nähdään että, jännite laskee 0,11 V yhtä SOC prosenttia kohden.



Kuva 3.1: FB8244152XP kennon purkukäyrä

Eli 80 A:n virralla 4,5 Ah:n akun kennon jännite putoaa 3 V:n kohdalla 54 mV, kuten kaavasta 3.3 nähdään.

$$\frac{0,11 \text{ V}}{3600 \text{ s/h} \times 4,5 \text{ Ah} \times 0,01} \times 80 \text{ A} = 54 \text{ mV/s} \quad (3.3)$$

Tämän tuloksen valossa akkujen jännitettä täytyy näytteistää yllättävän suurella taajuudella, sillä esimerkiksi 10 s:n aikana kennojännite ehtii laskea 0,54 V, joka on todennäköisesti haitallista kennoille. 1 s:n näytteistysväkillä kennojännite ehtii

Taulukko 3.1: Syklaamisen kannalta olennaisia parametrejä

valmistaja	kennotyyppi	Lataus- jännite (V)	Purku- jännite (V)	latauksen- lopetusvirta (A)	Kapasiteetti (Ah)
Fullymax	FB8244152	4,2	3	0,225	4,5
Shida	80431150HP	4,2	2,75	0,225	4,5
Shida	CEL1044129D	x	x	x	5
Everwin	8443129HP	x	x	x	4,25
Everwin	8544152XT	x	x	x	4,4
Sanyan	SY1044125SXX	x	x	x	5
Kokam	SLPB11043140H4	x	x	x	4,8
Collection ps	8043150SP	4,2	2,75	x	4,5
GEB	LF9550150SH33C	3,65	2,3	x	4,5
Microvast	MV18650FP1-1	3,70	2,3	x	4,4

laskea pahimmassa tapauksessa 54 mV alajänniterajan alapuolelle. Myös muut kennot joista purkukäyrät ovat saatavilla käyttäytyvät samantyyppisesti akun varaus-tilan lähestyessä nollaa. Jännitteen laskunopeus SDL8043150HP-kennolla on 0,13 V SOC prosenttia kohden ja MV18650FP1-1-kennolla luku on 0,10 joten suurta eroa FB8244152XP:n arvoon 0,11 ei ole.

Akkuja kuormitetaan vastuskuormalla, jonka arvoa voidaan vaihdella väliotolla 400 mΩ ja 275 mΩ välillä. Näillä kuormaresistanssin arvoilla akun purkuvirta on, hieman sisäresistanssista riippuen, noin 53 A tai 75 A. Pienempi virta vastaa koneen keskimääräistä käyttötehoa ja suurempi virta vastaa kuormitusta, kun konetta käytetään maksimiteholla. On mahdollista, että 275 mΩ kuorma on liikaa joillekin akuille, tai että akut menettävät kapasiteettiansi hyvin nopeasti tällä kuormalla. Siksi akkuja kuormitetaan ensin 400 mΩ kuormalla, joka kaikkien akkujen pitäisi kestää. Kun 400 mΩ kuormituksesta on saatu tarpeeksi tietoa muutetaan kuorma 275 mΩ:n.

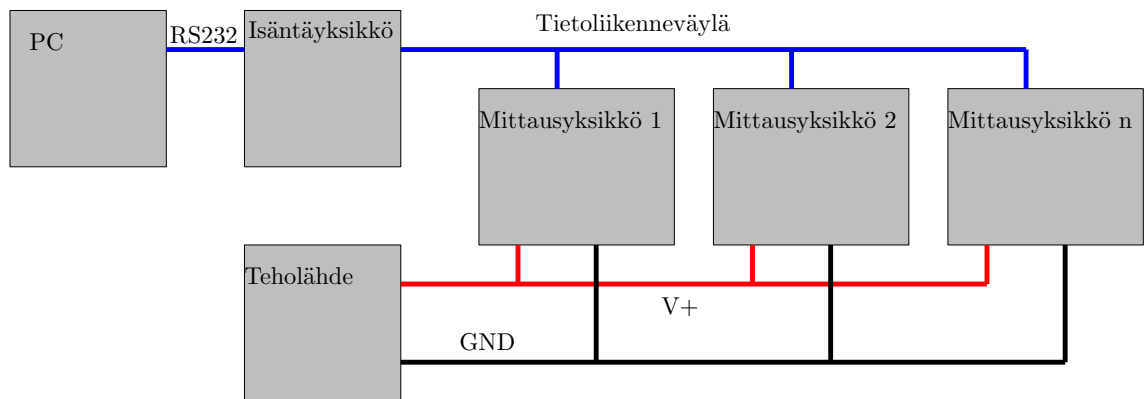
Samaa kemialla käyttävät akut ovat keskenään tarpeeksi samanlaisia, jotta niitä voidaan syklittää samoilla parametreillä. Taulukossa 3.1 on esitetty tarkastelun kohteena olevien akkujen parametrit, jotka ovat syklaamisen kannalta olennaisia.

Kaikki LiPo akut syklitetään jännitevälillä 3 – 4,2 V. Osalla LiPo akuista minimijännite on alempi kuin 3 V, mutta 3 V:n kohdalla lähes kaikki akun energia on käytetty. Tämä näkyy hyvin esimerkiksi kuvasta 3.1 Myös muiden LiPo akkujen kohdalla joista purkukäyriä on saatavilla tämä fakta näkyy selvästi. Everwinin, Sanyan ja Kokamin akuista ei ole tietoa, josta niille voisi päätellä syklayspanparametrejä, mutta LiPo kemialla käyttävinä niiden pitäisi käyttäytyä samalla tavalla, kuin muiden LiPo-akkujen, joista tämä data on saatavilla. LiFePo4 akut ovat muuten samanlaisia lataus ja purkukäyttämistä LiPo-akkujen kanssa, mutta niiden lataus- ja purkujänniterajat ovat erisuuret (3,65 V, 3,70 V ja 2,3 V).

Kaikkia akkuja ladataan 4,5 A:n virralla, joka vastaa 1 C:n latausta. Akkujen kapasiteeteissa on pieniä eroja ja pienimmälle 4,25 Ah:n akulle virta vastaa 1,05 C:n latausta ja suurimmalle 5 Ah:n akulle se näkyy 0,9 C:n latausvirtana. Latausvirta saattaa tuoda joitakin eroja akkujen elinkään, sillä osalle akuista 1 C on ilmoitettu maksimilatausvirraksi suositellun latausvirran ollessa 0,5 C, kun taas osa akuista kestää 2 C:n latausvirtaa. Prototyyppikone tulisi kuitenkin pystyä lataamaan tunnissa, joten latausvirtana käytetään 4,5 A:a

3.3 Testausjärjestelmä

Vaihtelevan akkumäärän tutkimiseksi mittalaitteistosta tehdään modulaarinen järjestelmä, jonka kokoa voidaan muuttaa ohjelmistomuutoksella ja lisäämällä mittausyksiköitä järjestelmään. Yksi yksikkö huolehtii yhden akun lataamisesta, kuormittamisesta ja instrumentoinnista. Akkuyksiköitä hallitsee isäntälaitte joka lukee mittausyksiköiden tulokset, ohjaa niiden toimita ja lähettää mitatut arvot tietokoneelle varastoitaviksi. Koska mittausyksiköiden tehontarve akkuja ladatessa on 100 W luokkaa tarvitsee niitä ruokkivan tehonlähteen olla kohtalaisen suuritehoinen, sillä esimerkiksi 10 mittayksikön järjestelmä tarvitsee jo 1 kW:n tehon.



Kuva 3.2: Järjestelmä yleiskaavio

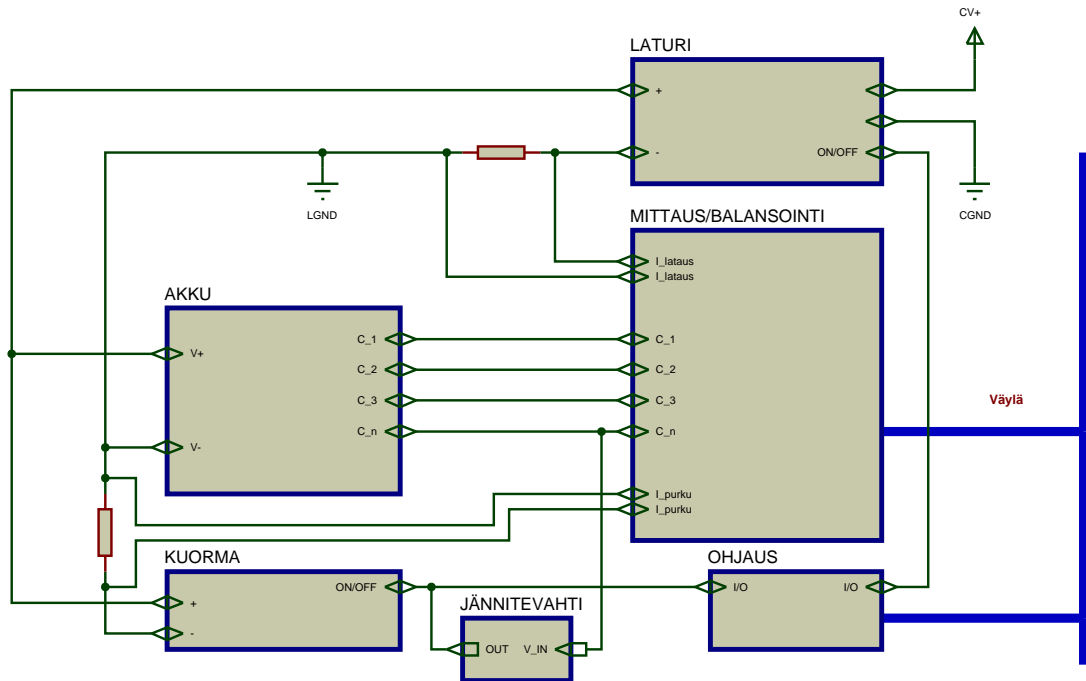
Akut testataan automaattisella testausjärjestelmällä, joka lataa ja purkaa akkuja automaattisesti. Samalla akuista mitataan kennojännitteet, kuormavirta ja akuston ja ympäristön lämpötila. Mikrokontrolleri lähettää kerätyt tiedot tietokoneen sarjaporttiin. Tiedot tallennetaan tietokoneelle, myöhempää prosessointia varten. Mitatuista suureista selviävät akkujen kapasiteetti, sisäinen resistanssi purkauksen alussa ja lopussa sekä akun lämpenemä. Karkean tason kuva järjestelmästä on esitetty kuvassa 3.2.

3.4 Mittausyksikön rakenne

Mittausyksikkö koostuu akustoa lataavasta hakkurista, kuormasta ja mittaus/kontrolli elektroniikasta. Lohkokaavio on esitetty kuvassa 3.3.

Jotta järjestelmää voitaisiin käyttää erilaisten akkukemioiden ja erikokoisten akkujen testaamiseen jokaisessa mittausyksikössä on oma akkulaturi. Tämä mahdollistaa jänniterajan ja virtarajan asettamisen erikseen jokaiselle akulle.

Akun virtojen mittaamiseen käytetään kahta erillistä virranmittausvastusta lataus- ja purkuvirroille on omat vastuksensa. Kahden erillisen vastuksen käyttäminen on



Kuva 3.3: Mittausyksikön lohkokaavio

perusteltua, koska niiden mittaamat virrat poikkeavat toisistaan huomattavasti. Latausvastus mittaa maksimissaan 10 A:n virtaa kun purkuvastuksen mittausalue riittää 100 A:n asti.

Akku puretaan resistiiviseen lankavastukseen, jossa kuluva teho vastaa hitsauskoneen tyypillistä tehoa. Vastuksessa on lisäksi ylimääräinen kytkentäpiste, jolla vastuksen ottamaa tehoa voidaan kasvattaa hitsauskoneen maksimitehoa vastaavaksi. Kuorman kytkinelementteinä käytetään mosfettejä.

Jännitevahti valvoo akun kokonaisjännitettä. Jos akun napajännite putoaa liiaksi jännitevahti kytkee kuorman pois päältä.

Mittauselektronikka mittaa edellä mainitut suureet ja digitoi ne mikrokontrollerin luettaviksi. Ohjauselektronikka muuttaa mikrokontrollerin väylältä tulevat komennot logiikkatasoiksi jotka ohjaavat kuormaa ja laturia.

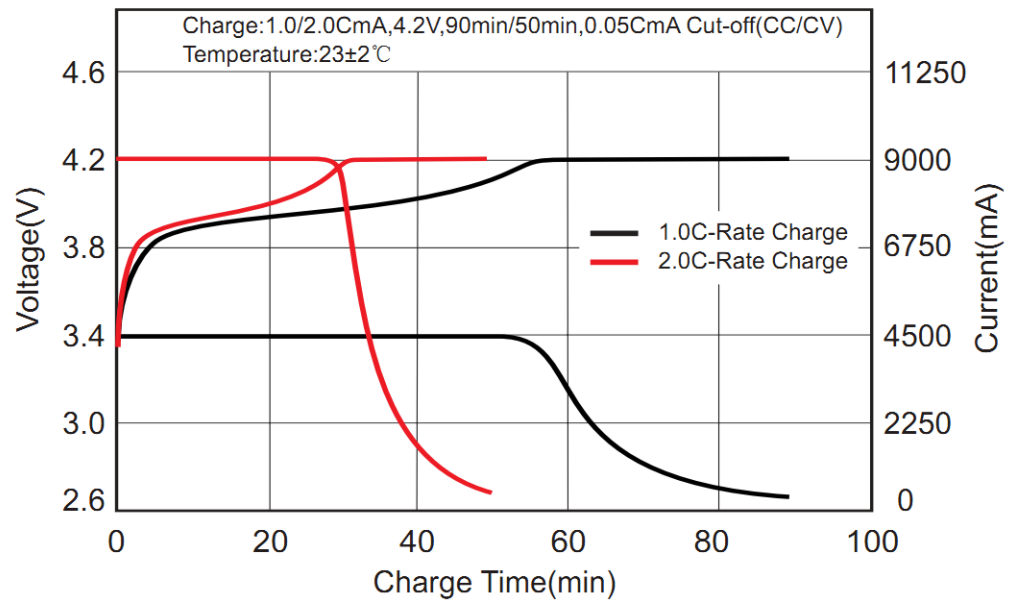
3.5 Latauselektroniikka

Litiumakkuja tulee ladata CC-CV metodilla. Eli akkua ladataan ensin vakiovirralla kunnes napajännite nousee valmistajan ilmoittamaan arvoon. Tämän jälkeen akun napajännite pidetään vakiona, kunnes akun ottama virta putoaa johonkin sopivan pieneen arvoon.

Laturin suunnittelu koostuu ohjattavan virtalähteen ja sitä ohjaavien säätimien suunnittelemisesta

3.5.1 Akun mallintaminen laturin kuormana

Akkua voi mallintaa karkeasti suuren kondensaattorin ja vastuksen sarjaankytkentänä. Kondensaattorin kapasitanssi ja vastuksen resistanssi voidaan laskea kuvan 3.4 käyristä.



Kuva 3.4: FB8544152XP 4500 mAh kennon latauskäyrä

Kapasitanssi saadaan laskettua jännitekäyrän kulmakertoimesta ennen laturin siirtymistä vakiojännitevaiheeseen. Kulmakertoimen ja kapasitanssin suhde on esitetty kohdan 3.4 kaavoissa.

$$\begin{aligned} I &= dQ/dt \\ dU/dt &= \frac{dQ/dt}{C} \\ C &= \frac{I}{dU/dt} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Kun kapasitanssi tiedetään, voidaan resistanssi laskea pienenevän latausvirran

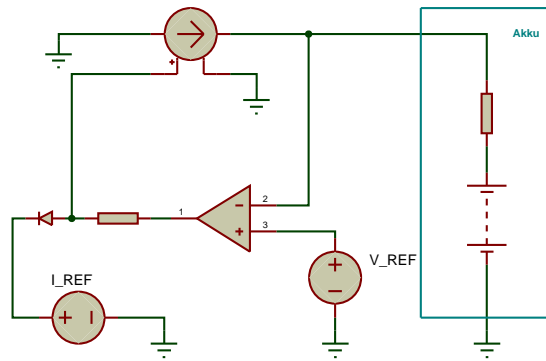
aikavakiosta. Kun laturi poistuu vakiovirtatilasta ja siirtyy vakiojännitetilään alkaa latausvirta laskemaan kaavan 3.5 mukaan. Kun kapasitanssi tiedetään, voidaan aikavakiosta laskea R .

$$I = I_0 \times e^{-\frac{t}{CR}} \quad (3.5)$$

FB8544152XP-kennolla ekvivalentti kapasitanssi on 1 C:n käyrästä laskien noin 15 kF, ja resistanssi on tällöin noin 39 mΩ. Resistanssi vaihtelee latausvirran ja akkukemian mukaan mutta karkeaan mallintamiseen käy 40 mΩ.

CC-CV laturin toimintaperiaate

Akkua ladataan ensiksi vakiovirralla akun varaustilan lähestyessä 100% kennojännite nousee suhteellisen jyrkästi. Kennojännitteen saavuttaessa akkukemialle tyypillisen maksimiarvon kytketään päälle säädin joka ohjaa virtalähdettä siten, että akun napajännite pysyy vakiona. tuloksena on akkujen latauskäyrästä tuttu eksponentiaalisesti laskeva virta. Kuvassa 3.5 on esitetty CC-CV toiminnan periaate.



Kuva 3.5: Periaatekuva laturista

Jos akun napajännitteen pitämiseen arvossa V_{ref} tarvitaan vähemmän, kuin normaali latausvirta, diodi estää virtareferenssiä vaikuttamasta virtalähteen ohjeeseen ja jännitetakaisinkytkentä ohjaa jännitteen V_{ref} :n suuruiseksi. Jos jännitesilmukan antama virtaohje on suurempi kuin I_{ref} diodi rajoittaa virtalähteen ohjeen maksimissaan I_{ref} :n suuruiseksi.

Ohjattava virtalähde

Hyvä tapa virtalähteen toteuttamiseksi on antaa induktorille jännitepulssi ja antaa virran nousta virtaohjeen määräämään arvoon, jonka jälkeen jännite kytketään pois päältä ennaltamäärätyksi vakioajaksi jonka aikana virta laskee hieman huippuarestaan. Tuloksena on virtalähde jonka ulostulovirta seuraa virtaohjetta nopeasti ja suhteellisen tarkasti

Keskimääräisen latausvirran riippuvuus ohjeesta V_{ohj} voidaan laskea kohdassa 3.6 esitetyistä kaavoista.

$$\begin{aligned} I_{av} &= I_{DC} + \frac{I_{rip}}{2} \\ I_{DC} &= I_{pk} - I_{rip} \\ I_{pk} &= V_{ohj} \\ I_{rip} &= \frac{T_{off} V_{out}}{L_{out}} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Näistä yhtälöistä voidaan ratkaista kohdan 3.7 ratkaisu

$$I_{av} = V_{ohj} - \frac{T_{off} V_{out}}{L_{out}} \quad (3.7)$$

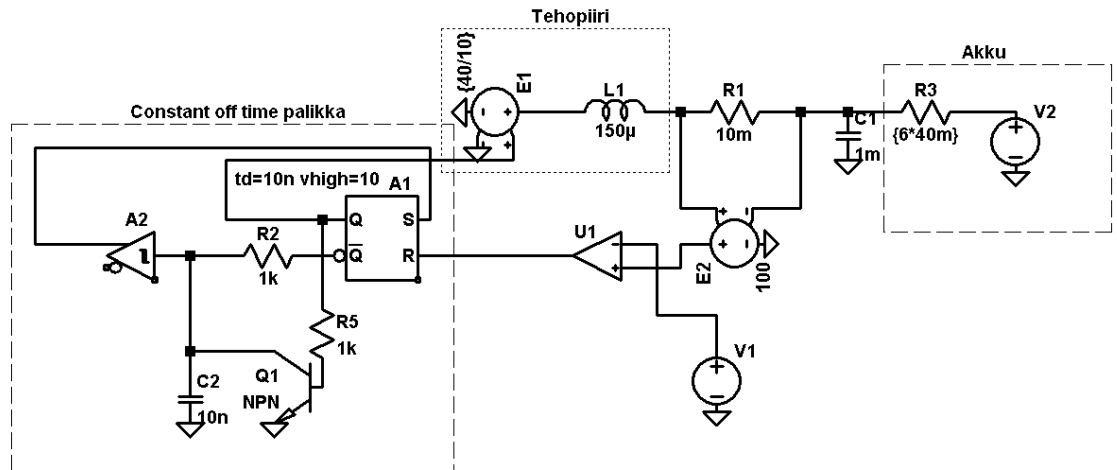
Termi $\frac{T_{off}}{L_{out}}$ yhtälössä 3.7 esittää virtalähteen konduktanssia. Jos T_{off} on esimerkiksi $3 \mu s$ tulee konduktanssin arvoksi $0,02 S$ tai 50Ω . Koska akun kennojännite muuttuu LiPo kemialla $7,2 V$ ja LiFePo4 kemialla $8,1 V$, muuttuu latausvirta hie-
man latauksen edistyessä, jos laturia käytetään ilman latausvirran takaisinkytkentää. Takaisinkytkentää käyttämällä saadaan virtalähteen impedanssi nostettua niin korkealle, ettei akun muuttuva napajännite käytännössä vaikuta latausvirtaan.

Virtalähteen kytkentätaajuus määräytyy kohdan 3.8 kaavojen mukaan seuraavas-
ti:

$$\begin{aligned} f &= \frac{1}{T_{on} + T_{off}} \\ T_{on} \frac{V_{sw} - V_{out}}{L_{out}} &= T_{off} \frac{V_{out}}{L_{out}} \\ T_{on} &= T_{off} \frac{V_{out}}{V_{sw} - V_{out}} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Arvoilla $T_{off} = 3 \mu s$, $V_{sw} = 40 V$ ja kuormajännitteen vaihdellessa välillä $13,8 - 25,2 V$ kytkentätaajuus vaihtelee välillä $220 - 120 kHz$

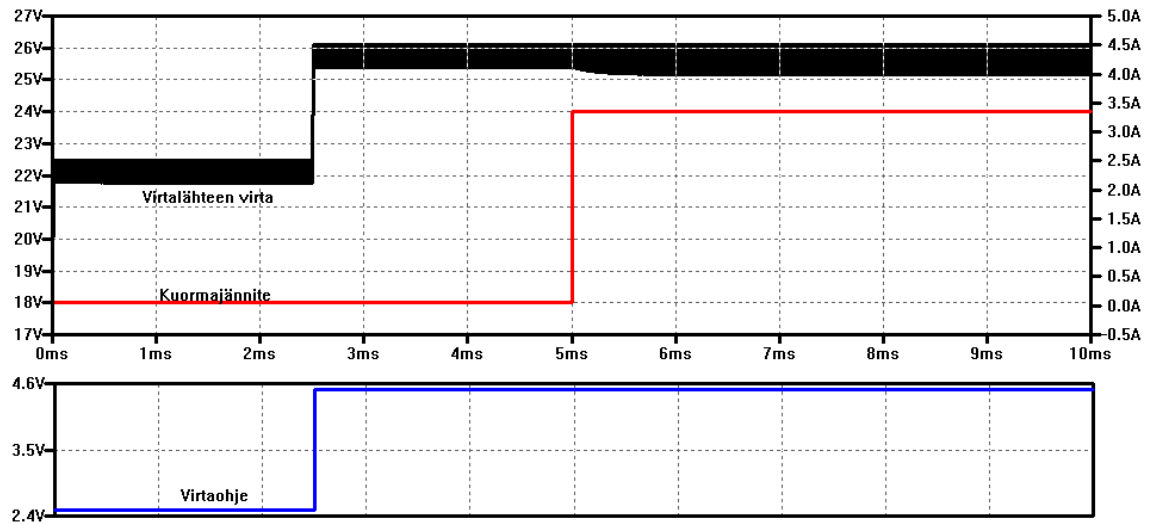
Virtalähteen toiminnan tarkemmaksi tutkimiseksi virtalähteen toimintaa simu-
lointiin LTspice ohjelmalla. Simulaatiomalli on esitetty kuvassa 3.6



Kuva 3.6: Virtalähteen simulointimalli

Simulaation tulokset näkyvät kuvassa 3.7. Virtalähteen toimintaa on simuloitu 10 ms:n ajalta. Virtaohje on aluksi 2,5 A ja nousee 2,5 ms kohdalla 4,5 A:n. Kuormajännite vastaa alussa tyhjää 6S akkua jonka kaikkien kennojen kennojännite on 3 V. 5 ms:n kohdalla kuormajännite nostetaan vastaamaan täydempää akkua (kennojännitteet 4 V).

Kuvasta käy ilmi, että virtalähde seuraa virtaohjetta hyvin, mutta kuormajännitteen nouseminen vaikuttaa hieman latausvirran arvoon.



Kuva 3.7: Virtalähteen simuloituja käyrämuotoja

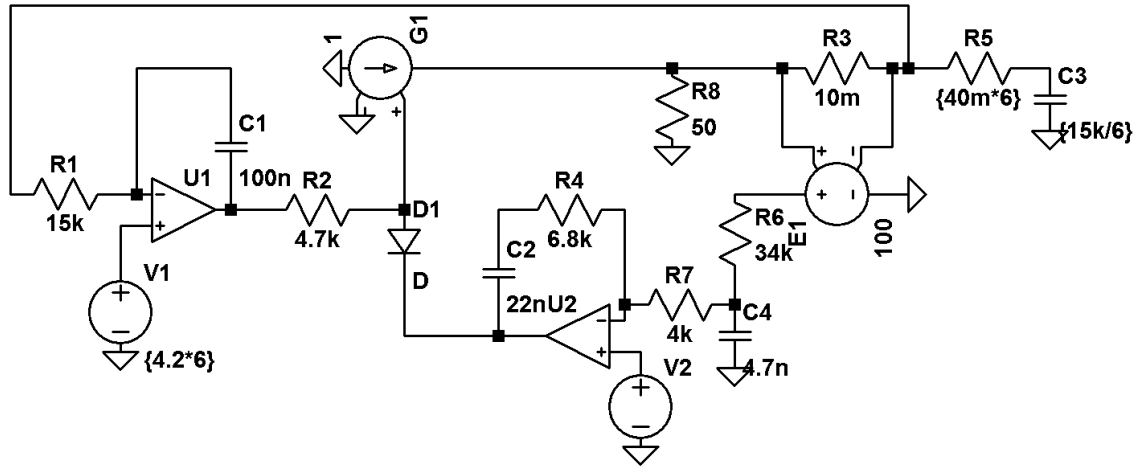
Laturin säätöelektroniikka

Jotta virta- ja jännitearvot pysyisivät tarkasti asetusarvoissaan toteutuneita virta ja jännitearvoja verrataan referenssiarvoihin ja virtalähteen toimintaa säädetään tarpeen mukaan. Eli virta- ja jännitearvot takaisinkytketään. Takaisinkytkennän operaatiovahvistimet kytketään integraattoreiksi, jotta DC virheet pysyisivät pienenä, ja toisaalta jotta arvaamattomasti käyttäytyvät korkeataajuiset singaalit eivät vaikuttaisi järjestelmään. Säätöelektroniikan simulointimalli on esitetty kuvassa 3.8

G1 ja R1 muodostavat edellä kuvatun virtalähteen. Virtalähteen toiminnasta aiheutuvia korkeataajuisia signaaleja ei ole mallinnettu, sillä niiden simuloiminen veisi kohtuuttomasti aikaa ja suuresta taajuudesta johtuen niiden vaikutus integraattoreihin on vähäinen.

R2 ja C1 simuloivat 6:ta sarjaankytkettyä LiPo kennoa, jolloin mallin resistanssi on yhden kennon tapaukseen verrattuna 6-kertainen ja kapasitanssi yksi kuudesosa.

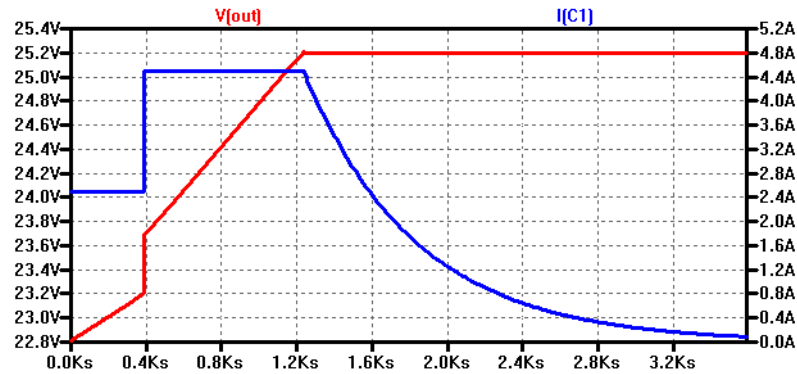
U1 ja U2 oheiskomponentteineen ohjaavat virtalähdettä siten, että haluttu jännite ja virtaohje toteutuu. Diodi D1 ja vastus R6 toimivat siten, että ohjeista aina pienempi toteutuu. Integraattoreiden integrointinopeuden tulee olla tarpeeksi suuri,



Kuva 3.8: Laturin säätöelektronikan simulointimalli

jotta säätöarvot pysyvät paikallaan akun napajännitteen muuttuessa, mutta myös samalla tarpeeksi pieni, että virtalähteen kytkentätaajuus ja muut häiriöt eivät vaikuta säädinten toimintaan. Koska akun napajännite muuttuu järkevillä latausvirroilla hyvin hitaasti, ja toisaalta hakkurin kytkentätaajuus ja muut häiriöt ovat suhteellisen korkeataajuisia, voi integraattorin integrointinopeuden valita suhteellisen vapaasti.

Kuvassa 3.9 on esitetty simuloinnin tulokset.



Kuva 3.9: Simuloitu lataustapahtuman loppu

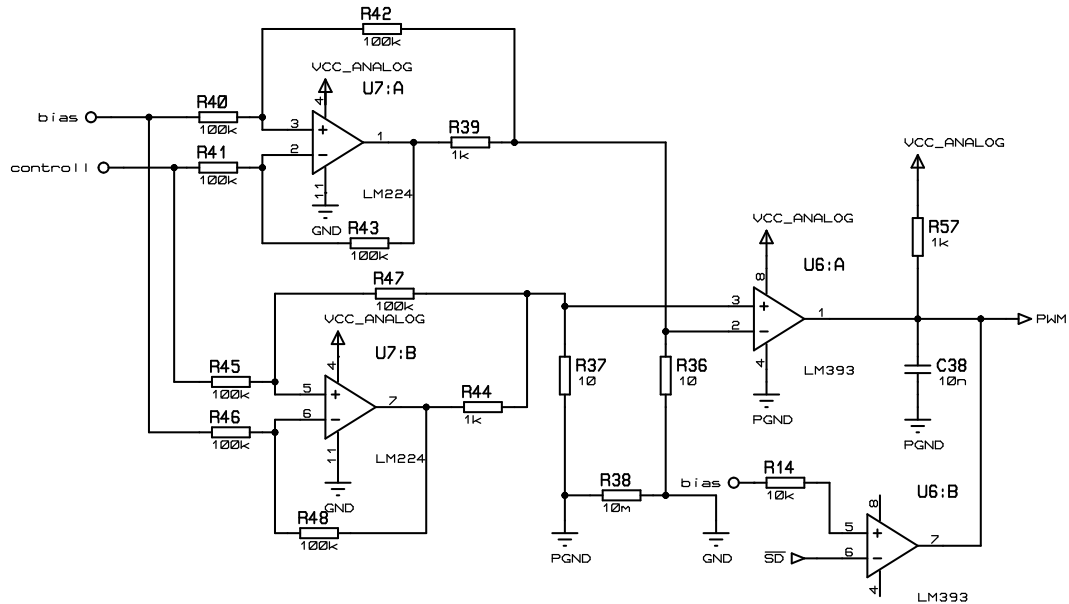
Simulaatiossa simuloidaan akun latauksen loppuvaiheita. Virtaohjetta muutetaan 400 s kohdalla 2,5 A:sta 4,5 A:n

Simulaation perusteella valittu ohjausmetodi toimii hyvin. Toteutunut virta seuraa ohjetta, ja jännitteen saavuttaessa jänniteohjeen määräämän rajan alkaa latausvirta putoamaan ja jännite pysyy vakiona.

Latauselektroniikan käytännön toteutus

Ohjattavan virtalähteen rakenne

Kuvassa 3.10 on esitetty ohjattavan virtalähteen ohjausjännite-pwm osio joka muuttaa ohjausjännitesignaalin pwm signaaliksi joka tuottaa halutun virran.



Kuva 3.10: Virtalähteen jännite->pwm osio

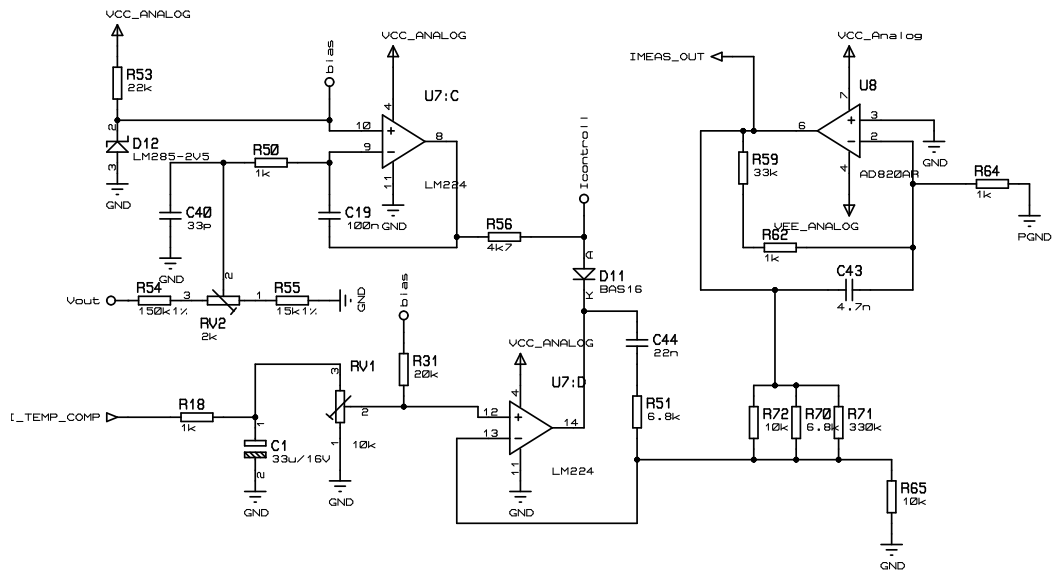
Osio koostuu vahvistimista U7:A,U7:B ja komparaattorista U6:A sekä niihin liitetyistä oheiskomponenteista. U7:A ja U7:B muodostavat virtalähteet, jotka biasoivat U6:A sisään tulot siten, että halutun huippuvirran kulkiessa R38:n läpi komparaattorin ulostulo vetää PWM lähdön alas. Komponentit on mitoitettu siten, että sisäänmenossa 2,5 V on nollassa ja virtalähteen huippuvirta muuttuu 1 A:n verran ohjausjännitteen muuttuessa 1 V:lla.

U6:B varmistaa, että virtalähteen käynnistyessä FETin jännite on aluksi alhaalla. Tämä on tärkeää jotta fetiajurin highside puolen kondensaattorit latautuisivat ja sillan ylempät fetit pystytään kytkemään päälle T_{off} jakson loppuessa.

Komparaattorin ulostulo on avoin kollektori tyyppinen. Ulostulon mennessä alas, ulostulotransistori tyhjentää C38:n hyvin nopeasti, jolloin R38:n virta laskee ja komparaattorin ulostulotransistori lopettaa ulostulon alasvetämisen. C38 alkaa latautua R57 kautta, kunnes C38 jännite saavuttaa fetiajurin sisäänmenon kynnysjännitteen. Tämä jännitteen nousuaika määrittää ajan jolloin fetiajuri pitää ulostulonsa alhaalla. Tämä aika voidaan laskea kaavasta: 3.9.

Säädinten rakenne

Kuvassa 3.12 on esitetty hakkurin säätöelektroniikan kytkentäkaavio Jännitesäädin rakentuu U7:C ympärille. Latauksen loppujännitteen säätö tapahtuu säätämällä RV2:lla jännitetakaisinkytkennän vahvistus sellaiseksi, että täyden akun napajännite tuottaa operaatiovahvistimen ei invertoivaan sisääntuloon 2,5 V:n jännitteen.



Kuva 3.12: Virta-jännitesäätimen käytännön toteutus

Akuille sopiva maksimilatausvirta riippuu akkujen lämpötilasta ja akkutyypistä. Alkuperäisen suunnitelman mukaan testi oli tarkoitus saada valmiiksi kesän aikana jolloin akkujen lämpötila ei olisi ollut suuri ongelma. Satunnaisen hallayön ajaksi lataus olisi vain voitu keskeyttää. Näin olisi voitu käyttää kiinteää latausvirtarajaa, ohjelmallisesti säädettävän sijaan. Aikataulun venyessä syksyyn päätettiin, että latauksen keskeyttämisen sijasta olisi hyvä, jos latausvirtaa voisi laskea ja akkuja pystyisi syklaamaan hitaammalla tahdilla kylmien hetkien aikana, testin keskeyttämisen sijasta. Aikataulun edelleen venyessä talveen akuille järjestettiin lämitys, joka taas vähensi latausvirran lämpötilasäädön tarvetta.

Ohjelmallinen lämpötilansäätö toteutettiin kaikille testikortteille yhteisenä I_temp_comp signaalina joka yhdistettiin RV1:n, jännitereferenssin paikalle vahvasti alipäästösuodatettuna. Alipäästösuodatus poistaa korkeataajuiset häiriöt, jotka johtuvat mittausyksikön ja isäntälaitteen maatasen eroista. Maatasojen välinen DC ero aiheuttaa asetettuun virtaan pienen virheen.

U7:D puskuroi virtaohjeen ja ottaa takaisinkytkennän A/D-muuntimelle mene-

västä virranmittaussignaalista. Takaisinkytkennän tarkoituksena oli poistaa diodista ja kuormajännitteen vaihtelusta aiheutuva latausvirran muuttuminen. I_temp_comp signaalin kanssa takaisinkytkennän hyöty on kuitenkin kyseenalainen, sillä maatasojen eroista johtuva virhe I_temp_comp signaalissa on suurempi kuin esimerkiksi kuormajännitteen vaihtelusta aiheutuva vaikutus. Diodin vaikutuksen poistamiseen riittäisi, että U7D:n takaisinkytkentä otettaisiin diodin D11 anodilta.

U8 vahvistaa R38:n yli olevan signaalin A/D-muuntimelle sopivaksi. A/D-muuntimen signaalia käytetään myös virran takaisinkytkentään. Ennen I_temp_comp signaalin toteutusta RV1 oli kytketty 2.5V:n jännitereferenssin ja maan väliin. R72, R70, R71 ja R65:n muodostavat jännitteenjakajan joka skaalaa $3,4 \text{ V}/10 \text{ A}$ signaalin $2,5 \text{ V}/10 \text{ A}$ tasoon

Akkujen latausvirta säädetään asettamalla I_temp_comp signaali maksimiarvoonsa, ja säätämällä RV1:tä kunnes latausvirta on halutun suuruinen. Laitteiden latausvirtaa voidaan skaalata säätämällä I_temp_comp signaalin suuruutta.

R31 antaa virtasäätimelle pienen positiivisen ohjeen vaikka I_temp_comp signaali olisi 0 V. Tämä on tärkeää, sillä jos U7:D tulkitsee, että virtaohje on pienempi kuin 0 A vetää virtalähde akusta virtaa hakkurin ensiökondensaattoreihin ja laitteiston teholähteeseen. Jos mikään ei kuluta ylimääräistä sähköä ensiöstä, ensiön jännite nousee kunnes jokin komponentti antaa periksi. Negatiiviselta näyttävä jänniteohje voi olla tulosta operaatiovahvistimen offsetjännitteistä tai todennäköisimmin mittauskorttien ja isäntälaitteen maatasojen välisistä eroista. Shunttivastuksen yli vaikuttaa hakkurin kytkentätaajuinen jännite, joka aiheuttaa sen että I_temp_comp signaali näkyy mittausyksikölle melko häiriöisenä. Häiriöt suodetaan pois RC-suotimella, jonka jälkeen jäljelle jää shunttivastuksen läpi menevän virran dc komponentista aiheutuva virhejännite, joka jää aiheuttamaan virhettä asetettuun latausvirtaan.

Parannusehdotuksia

Laitteistoa käytettäessä nousi esiin muutamia kohtia, jotka laturissa olisi kannattanut tehdä toisin.

Sulake laitteiston ulostulossa antaisi lisä varmuttaa komponenttien rikkoutumisen varalle. Tällä hetkellä laturin alemman mosfetin rikkoutuminen oikosulkee akun ja tämä oikosulku puolestaan rikkoo akun ja kaikki komponentit jotka ovat oikosulun tiellä. Tilannetta jossa sulakkeesta olisi ollut apua, ei testien aikana ilmaantunut, mutta se olisi silti hyvä lisätä mahdollisiin tuleviin versioihin.

Myös mittausyksikön sähkönsyöttö kaipaasi sulaketta. Jos mittausyksikön laturin mosfetit menevät molemmat oikosulkuun ja mittausyksikön käyttöjänniteraide oikosulkeutuu maahan, on vaarana että koko mittausjärjestelmän käyttöjännite putoaa akkujen napajännitteen alle jolloin akut alkavat syöttämään sähköä mittaus-

järjestelmään Q13:ta diodin kautta jolloin kaikki akut tyhjenevät. Riskiä oikosulun tapahtuessa pienentää ensiöpiirin suuri teho. Mittausjärjestelmän teholähde pystyy syöttämään piiriin 140 A ja tämän lisäksi jokainen akku pystyy syöttämään oikosulkuun satoja ampeereja, joten on todennäköistä että oikosulkuun menneen piirilevyn vedot palavat poikki toimien sulakkeena.

Hakkurissa ei ole pulssinleveyden rajoitusta. Jos virta ei saavuta asetettua huippuarvoa fettiajuri yrittää pitää ylempää mosfettiä kytkettynä loputtomiin, joka ei onnistu sillä mosfetajurin varauspumppu, joka tekee erotetun ajojännitteen ylemmälle mosfetille, vaatii toimiakseen vaihtojännitteen switch-noodiin. Tuloksena on hakkurin jumittuminen. Maksimiarvon määrittäminen hakkurin T_{on} ajalle, ratkaisisi tämän ongelman. Samalla hakkurin käynnistyminen yksinkertaistuisi, sillä kytkentäsykliä ei tarvitsisi aloittaa alhaallaolo-tilasta ja tästä huolehtiva elektroniikka voitaisiin poistaa.

Latausvirran mittaukseen ja hakkurin hallintaan käytettävä shunttivastus R38 on kytketty maan puolelle. Tämä lisää korttien välisen tietoliikenteen häiriötasoja. Virranmittauksen siirtäminen maasta ulostuloon antaisi kaikille mittakorteille paremman maayhteyden toisiinsa, joka vähentäisi tietoliikenteessä tapahtuvia virheitä.

3.6 Mittauselektroniikka

Akkujen vanhenemisen tutkimiseksi on niiden kapasiteetti mitattava. Hyödyllinen purkukapasiteetti saadaan mitattua integroimalla purkuvirta kun akku puretaan täydestä tyhjäksi.

Akkujen syklaamiseen tarvitaan tietoa akkujen latausvirrasta ja jännitteestä, jotta purkusykli voidaan lopettaa oikealla hetkellä ja jotta tunnistetaan milloin akku on täynnä.

Jännitemittaus on ongelmallinen sillä sen pitää saavuttaa kohtalaisen suuri tarkkuus suurten yhteismuotoisten jännitteiden läsnäollessa.

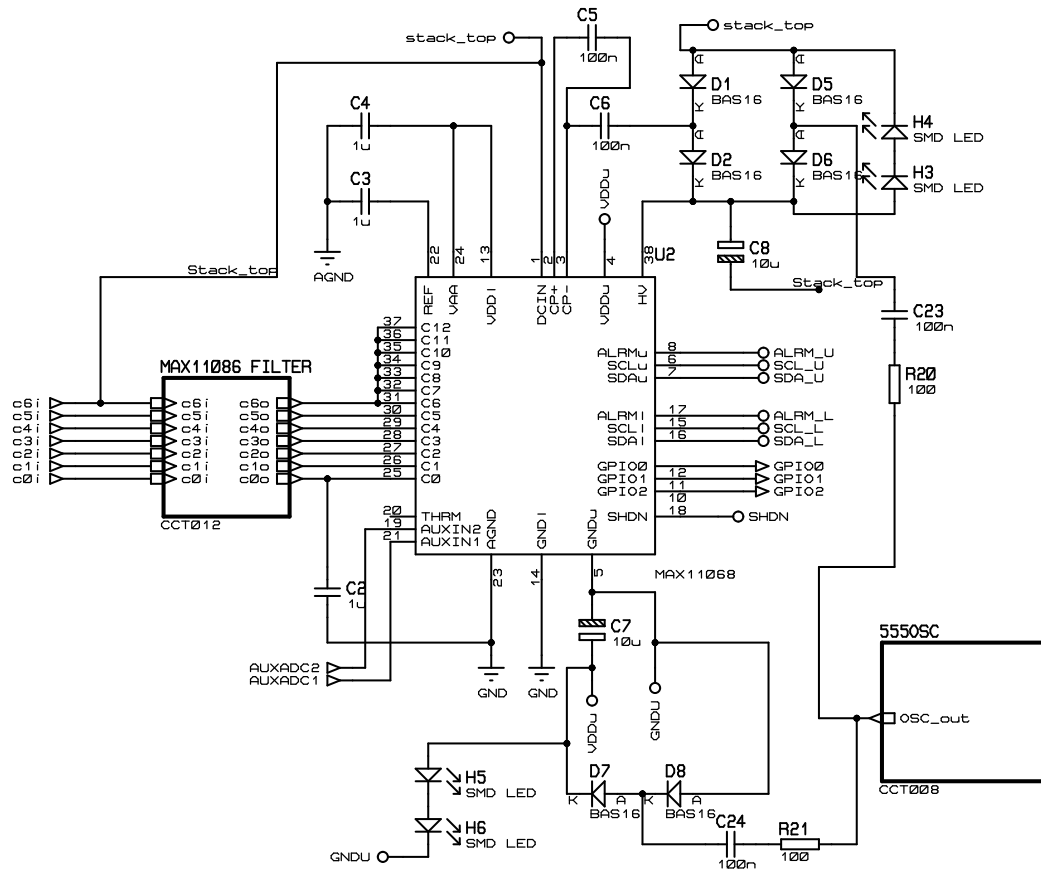
Eräs tapa yhteismuotoisten jännitteiden ongelman kumoamiseen on lentävä kondensaattori, jossa yksi kondensaattori multipleksataan kaikille kennoille puolijohdekytkinten avulla. Kun kondensaattori on latautunut sopivaan jännitteeseen, se irrotetaan kennosta ja kytketään puolijohdekytkimillä A/D muuntimeen, jolloin yhteismuotoiset jännitteet kumoutuvat lähes täydellisesti. Tämä ratkaisu vaatii kuitenkin huomattavan paljon komponentteja. Onneksi markkinoilta löytyy muutamia integroituja ratkaisuja, jotka ovat kehitetty nimenomaan akunhallintaan. Tämänlaisia ovat esimerkiksi MAX11068, LT6802, AD7280.

Mittausjärjestelmän ytimenä päätettiin käyttää MAX11068:aa, sillä se mahdollisti suuren mittausketjun rakentamisen ilman ylimääräisiä mikrokontrollereita mitausyksiköissä

MAX11068

MAX11068 mahdollistaa 12 sarjaankytketyn kennon jännitteiden mittaamisen ja balansoinnin. Lisäksi piirissä on 2 yleiskäyttöistä A/D kanavaa joita käytetään virtamittauksiin, ja 3 Yleis-I/O lähtöä joilla voidaan ohjata. Laturia ja kuormavastusta.[5] Piirin ohjaaminen tapahtuu I2C väylän kautta, jonka piirit välittävät ketjussa toisilleen puskuroituna ja erilaisten maatasojen välillä muunnettuna. Väylä kulkee ensin piirin alempaa I2C porttiin ja isännältä tuleva data välitetään ylempään I2C porttiin. MAX11068 on suunniteltu sarjaankytkettäväksi jolloin ensimmäisen piirin käyttöjännite on seuraavan piirin maa, mutta tässä järjestelmässä kaikki piirit ovat maahan kytkettyjä ja maatasoissa on korkeitaan joidenkin satojen millivolttien eroja. Näin kytkettynä piirin oma varauspumppu ei toimi sillä sen elektroniikka ilmeisesti tarvitsee jännitettä ylempään I2C porttiin toimiakseen. Varauspumppu on kuitenkin tarpeellinen, sillä Ylempi I2C portti tarvitsee piirin normaalista maatasosta erotetun käyttöjännitteen, lisäksi piirin sisäinen multiplekseri joka mahdollistaa kennojen jännitteiden tarkan mittauksen ja balansoinnin vaatii enemmän jännitettä kuin järjestelmästä normaalisti löytyy. Piirin sisäinen varauspumppu korvattiin 555 oskillaattoriin perustuvalla varauspumpulla, jonka jännite rajoitettiin valodiodeilla

3 V:n ja joka kehittää tarvittavan käyttöjännitteen multiplexerille ja ylemmälle I2C portille



Kuva 3.13: MAX11068 piirin kytkentäkaavio

Jännitemittaukset

Jännitteen mittaaminen on suoraviivaista. Akun yksittäiset kennot kytketään akun balansointiliittimen kautta RC-suodatinpankkiin joka suodattaa korkeataajuiset jännitehäiriöt pois. RC-suotimien mitoittaminen kovin matalille taajuuksille on hankalaa koska myös kennojen balansointivirta kulkee suotimien vastusten lävitse. Vastukset eivät siis voi olla arvoltaan kovin suuria, joten ainoa keino suotimien kais-tanleveyden pienentämiseksi on suodinkondensaattorin kasvattaminen. Komponent-tiarvoiksi valittiin $10 \mu F$ kondensaattori ja 10Ω vastus, jolla suotimen rajataajuu-deksi tulee 1600 Hz. Tämän taajuuden alle jäävät vielä monet häiriölähteet. 1600 Hz alempien häiriötaajuuksien suodattamisessa luotetaan akun kykyyn imeä nämä taajuudet (lähinnä 100 Hz ja 50 Hz).

Virtamittaukset

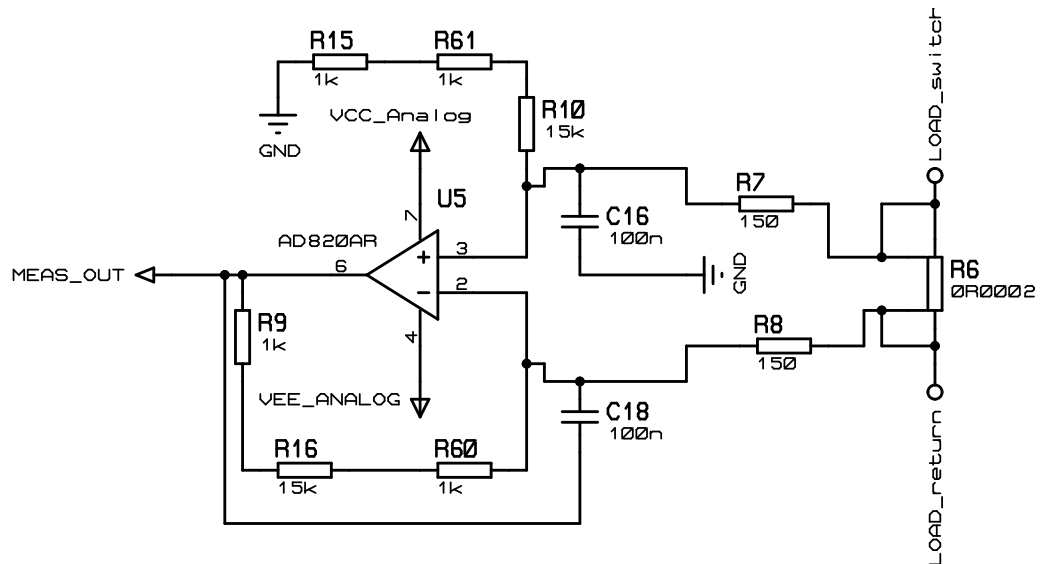
Akun lataus- ja purkuvirta mitataan erillisillä virranmittausvastuksilla, koska virtojen suuruudet poikkeavat toisistaan huomattavasti ja yhdellä mittausjärjestelyllä järkevän resoluution saavuttaminen molempiin mittauksiin olisi haastavaa.

Latausvirta

Latausvirta mitataan käyttäen hyväksi hakkurin huippuvirran mittausvastusta (kuvan 3.10 R38). R38:sta tuleva signaali on A/D muuntimen kannalta pieni, muuntimen maatasoon nähden negatiivinen ja sisältää hakkurin kytkentätaajuisia komponentteja. Signaalin suodatus ja invertointi on esitetty kuvassa 3.12. U8 oheiskomponentteineen alipäästösuodattaa virtasignaalin ja invertoi sen. Alipäästösuodatus on rajattu 1000 Hz:n jotta virtasäätimen takaisinkytkentä ei menisi liian hitaaksi. Ennen varsinaista A/D-muunninta on vielä toisen asteen RC filtti jonka kaistanleveys on 3,8 Hz, joka suodattaa loputkin häiriöt pois systeemistä.

Purkuvirta

Purkuvirta mitataan $200\ \mu\Omega$ shunttivastuksen yli olevana jännitteenä. Mittauskytkentä on esitetty kuvassa 3.14



Kuva 3.14: Purkuvastuksen jännitevahvistinkytkentä

Kytkenän vahvistus on 113,3 ja suodatuksen rajataajuus noin 100 Hz. Rajataajuuden alle jää merkittävistä häiriökomponenteista 50 Hz verkkosähkö. Tämä ei kui-

tenkaan haittaa sillä matalataajuiset häiriöt eivät pääse aiheuttamaan merkittävää signaalia shunttivastuksen ylitse. Esimerkkinä: jos 50 Hz verkkosähkö kytkeytyisi shunttipiiriin 1 nF:n kapasitanssin kautta, aiheutuisi shuntin ylitse 14 nV:n jännite, kun taas ampeerin kuormavirta aiheuttaa 200 μV :n jännitteen johon verrattuna aiheutunut häiriöjännite on mitätön.

Piirilevyn Layoutissa olevan virheen vuoksi vahvistinta ei ole kytketty shunttivastuksen päihin vaan hieman vastuksen päiden viereen kuparitasoihin. Tästä syystä vahvistin ei näe vastusta 200 $\mu\Omega$:n vastuksena vaan noin 30% suurempana. Alkuperäinen mitoitus 100 A/3,4 V ei siis päde ja LiPo akkujen kuormavirta olisi maksimikuormalla ja täydellä akulla mennyt A/D-muuntimen skaalan ylitse. Ongelmaa korjattiin Muuttamalla R7 ja R8 100 Ω :sta 150 Ω :n jolloin vahvistimen vahvistus pienenee 33%

tästä virheestä johtuen vahvistimen vahvistus on hieman epämääräinen. Alkuperäinen tavoite oli, että kortteja ei tarvitsisi erikseen säädellä virta ja latausjänniteasetukset pois lukien. Virheestä johtuen kortit on kuitenkin kalibroitava erikseen.

Purkuvirran kalibrointi suoritettiin 50 A:n virralla ja merkitsemällä tätä virtaarvoa vastaava A/D-muuntimen lukema muistiin.

MAX11068 havaittuja ongelmia

Akkuja syklitettäessä ilmeni muutamia ongelmia MAX11068:n kanssa.

Piiri jää jostain syystä jumiin toisinaan keskimäärin kerran viikossa. Piirin jäädessä jumiin kaikki toimii muuten normaalisti, mutta A/D-muunnin "jäätty" eli piiri antaa mittaustulokseksi vain yksiä ja samoja lukuja.

Toinen esille noussut ongelma liittyy I2C väylään. Jos ylemmän I2C portin joihimiin kohdistuu tietynlaisia häiriöjännitteitä, jää tämä portti jumiin.

Ainoa keino näiden ongelmatilanteiden poistamiseen on kytkeä piiristä sähkö pois.

Akkujen lämpötilan mittaaminen

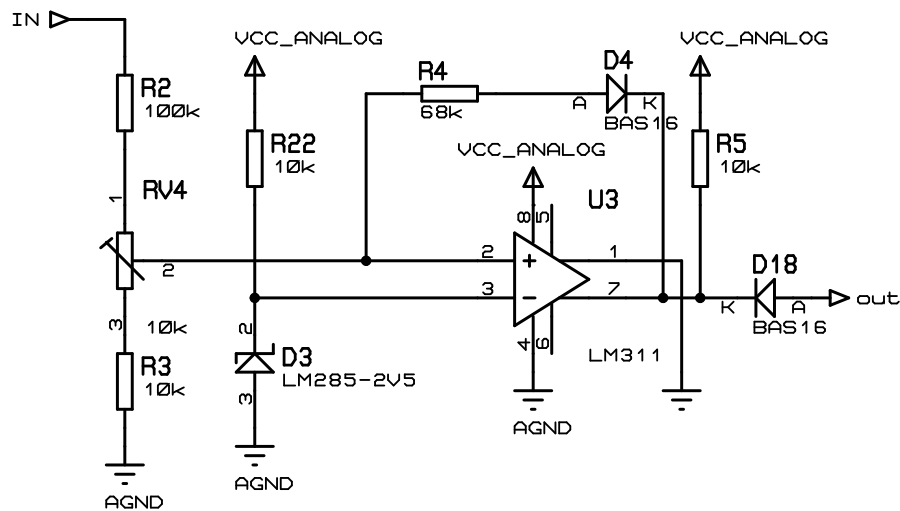
Lämpötilalla on suuri vaikutus litiumakkujen elinikään. Lisäksi lämpötila vaikuttaa akkujen purkukapasiteettiin ja sallittuun latausvirtaan.

Akkujen lämpötilan mittaamisessa käytettiin DS18B20 Lämpömittaria. DS18B20 pystyy mittaamaan lämpötilan $-55 - +125\text{ }^{\circ}\text{C}$ Välillä $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ resoluutiolla.

3.7 Kuorma

Akkuja kuormitetaan lankavastuksella jonka arvoa voidaan välilytkennällä muuttaa $400\text{ m}\Omega$ ja $275\text{ m}\Omega$ välillä. Kuormavastus kytketään päälle kolmella rinnankytketyllä IRLS4030 mosfetillä. Mosfetin hilaa ohjataan transistorikytkennällä, joka muuttaa MAX11068 3,4 V I/O signaalin 12 V:n jotta mosfetin resistanssi olisi mahdollisimman alhainen ja suuren virran kytkeminen onnistuisi.

Ohjelmointi- ja tietoliikennevirheiden varalta kuorman yhteydessä on alijännitevahti joka kytkee kuorman pois päältä, jos akun napajännite putoaa liian alhaiseksi. Alijännitevahti on toteutettu komparaattorilla, joka poistaa mosfettien hilaohjauksen akun napajännite laskee tietyn referenssitason alapuolelle. Kytkentä on esitetty kuvassa 3.15



Kuva 3.15: Alijännitevahdin kytkentäkaavio

Jännitetaso asetetaan modifioimalla sisääntulevaa jännitesignaalia RV4:n avulla. R4 luo kytkentään hystereesin, jotta akun napajännitteen nousu kuormavirran kadotessa, ei aiheuttaisi kytkennän värähtelemistä, joka todennäköisesti rikkoisi mosfettit. Hystereesin suuruus vaihtelee RV4:n vastuksen vaihdellessa. Tässä mielessä jännitetaso olisi ollut parempi asettaa vaihtelemalla ei-invertoivan sisääntulon jännitettä, mutta koska hystereesin tarkka arvo ei ole sovelluksessa mitenkään kriittinen, ei hystereesin vaihtelulla ole merkitystä. D18 estää mosfettien normaalia ohjaussignaalia vaikuttamasta alijännitekomparaattoriin.

Tämä alijännitevahtiratkaisu ei ole erityisen hyvä. Hystereesinkin kanssa värähtelyjen välttäminen ei ole täysin varmaa, sillä suurista kuormavirroista johtuen akun

napajännitteen muutokset voivat olla melko suuria. Komparaattorin ulostulo olisi kannattanut viedä fettien hilalle lukkopiirin kautta, joka olisi sitten erikseen re-setoitu MAX11068 I/O signaalilla. Myös litiumakkujen jännitteen käyttäytyminen suhteessa varaustilaan on komparaattori-suojapiiriratkaisulle ongelmallista. Jos kennojen varaustiloissa on suuria eroja voi yhden kennon jännite olla 0 V vaikka koko akun napajännite olisikin normaalin rajoissa. Esimerkiksi: 6S LiPo akun jännite voi periaatteessa vaihdella välillä 18 – 25,2 V, jos muiden kennojen jännite on vaikkapa 3,7 V, ja yhden kennon jännite on 0 V, paketin napajännite on 18,5 V ja 18 V säädetty alijänniteraaja ei vielä reagoi, vaikka sen olisi pitänyt reagoida jo huomattavasti aikaisemmin. Toisaalta jos kaikki kennot ovat tasapainossa keskenään ja kapasiteettiltaan yhtä suuria, akun napajännite voi laskea 18 V:n ilman ongelmia.

Paras ratkaisu olisi käyttää valmista suoja-IC piiriä esimerkiksi MAX11081 joka valvoo jokaisen kennon kennojännitettä erikseen. Tämä olikin alkuperäinen suunnitelma, mutta koska piiriä ei saatu toimimaan ja aikataulu kävi tiukaksi, päädyttiin komparaattoriratkaisuun

3.8 Ohjausyksikkö

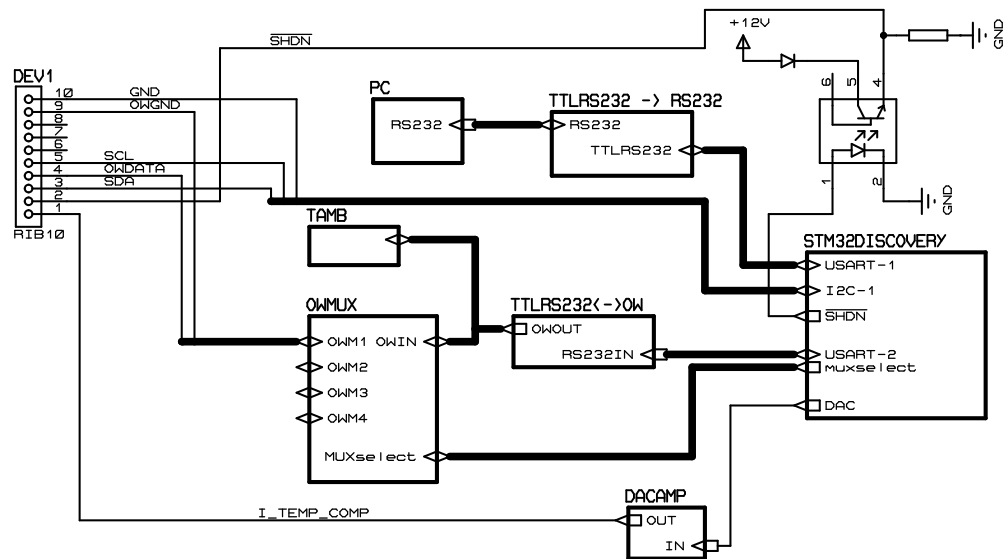
Laitteistoa ohjaa mikrokontrolleriyksikkö joka pyörittää syklausalgoritmia ja huolehtii tietoliikenteestä ja mittaustulosten lähettämisestä tietokoneelle tallentamista varten.

Ohjausyksikkö koostuu STM Discovery demolaudasta ja liitinkortista johon on lisätty erinäisiä tarpeellisia laitteita.

STM Discovery on STMicroelectronicsin esittelylaite STM32F100RB mikrokontrollerille. Tämän laitteiston kannalta oleelliset ominaisuudet ovat I2C väylä 2 sarjaporttia D/A-muunnin ja kohtalainen (8KB) RAM-muistin määrä.

kaaviokuva ohjausyksikön laitteista ja yhteyksistä on esitetty kuvassa 3.16

STM32-piirin 1 sarjaporttia käytetään mitatun datan lähettämiseen tietokoneelle. TTL tasoinen tietoliikenne muutetaan normaaliin +5 V:n sarjaporttitasoon häiriöiden välttämiseksi kun, tieto siirretään mittaus-pc:lle suojaamattomassa 7 m pituudessa johdossa. sarjaportti 2:ta käytetään onewire väylän ohjaamiseen. TTLRS232 <-> OW lohko koostuu DS2480B sarjaportti-onewire tulkista ja sen oheiskomponenteista. TTLRS232 <-> OW tulkaa sarjaportista lähetetyt tavut onewire protokollaan ja päinvastoin. Tämä poistaa tarpeen onewire protokollan ohjelmalliselta toteutukselta ja säästää aikaa ohjelmistokehitysvaiheessa. Koska onewire protokolla osoittautui erittäin häiriöherkäksi, se jaettiin pienempiin osaverkkoihin, jotka multipleksattiin onewiretulville. Ympäristön lämpötilaa mittaava lämpömittari sijaitsee väylällä multiplekseriä ennen ja sitä esittää TAMB-lohko. Onewire väylän multipleksaaminen toteutettiin HC4066 analogikytkimellä, jolla OWDATA signaali ohjattiin aina haluttuun väylän osaan. OWGND on sidottu isäntälaitteen maahan ja sitä ei



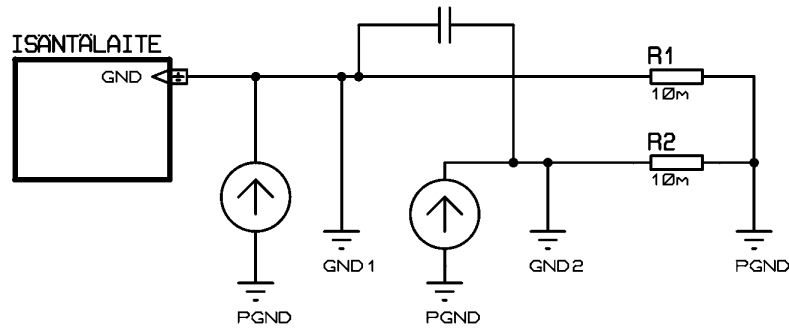
Kuva 3.16: Isäntälaitteen kaaviokuva

multipleksata. Mittausyksiköiden laturien virtaa säädetään I_TEMP_COMP signaalilla. DACAMP lohko purkuroi D/A muuntimen signaalin, koska mahdolliset 30 korttia kuormittavat tätä signaalia jo jonkin verran. Aikataulun venymisen vuoksi I_TEMP_COMP signaalin rooli on paljon tärkeämpi kuin alun perin oli tarkoitus. Koska testi oli tarkoitus ajaa kesällä, ei alhainen lämpötila ollut aluksi suuri ongelma ja satunnaisina kylminä öinä olisi akkujen lataaminen vain voitu keskeyttää hetkeksi. Aikataulun venyessä syksyyn ja lopulta talveen, latausvirran säätelystä tuli lopulta huomattavasti tärkeämpää, kunnes akuille saatiin järjestettyä lämmitys. Latausvirran säätelyn toteutus, jossa säätösignaali on verrannollinen isäntälaitteen maahan, ei ole erityisen tarkka, sillä mittauskortit vertaavat signaalia omaan maahansa, joka väylän ensimmäistä korttia lukuun ottamatta eroaa isäntälaitteen maasta latausvirran shunttivastusten yli olevien jännitteiden erotuksen verran.

Järjestelmän maadoitusratkaisu on esitetty kuvassa 3.17 Isäntälaitteen maa ja samalla onewire väylän maa ovat sidottuja ketjun ensimmäisen mittauskortin maahan (GND1) . Mittauskorttien maat ovat yhteydessä toisiinsa 10 mΩ shunttivastusten ja tehollähteen maan (PGND) kautta. Shunttivastuksen läpi kulkeva virta aiheuttaa eroa korttien maapotentiaaleihin. Maksimipotentiaaliero määräytyy laturin huippuvirran mukaan ja 10 A:n latausvirralla maapotentiaalien ero on 100 mV.

Kuvassa näkyvän kondenssaattorin tarkoitus on parantaa I2C väylän toimintaa. Tuntemattomasta syystä kyseisen kondenssaattorin lisääminen paransi väylän luo-

tettavuutta huomattavasti.



Kuva 3.17: Kuva laitteiston maadoitusjärjestelyistä

I_TEMP_COMP on ainoa signaali johon erot maapotentiaaleissa vaikuttavat. Erot eivät ole kovin suuria kahden kortin maatasen ero on maksimissaan 100 mV joka aiheuttaisi 10 A:n virralla $10 A / 2.5 V \times 0,1 V = 0,4 A$ tai 4%:n eron haluttuun virtaan. Lisäksi latausvirran tarkka asetusarvo ei ole kriittinen mittausten kannalta. Kuitenkin I_TEMP_COMP signaali olisi kannattanut toteuttaa differentiaalisena, tai lisätä D/A muuntimet mittauskorteille ja siirtää halutut arvot digitaalisena, jotta korttien maatasojen erot eivät vaikuttaisi signaalin siirtämään analogiseen informaatioon.

Muut signaalit ovat digitaalisia ja 100 mV:n ero ei riitä muuttamaan logiikkatasoa.

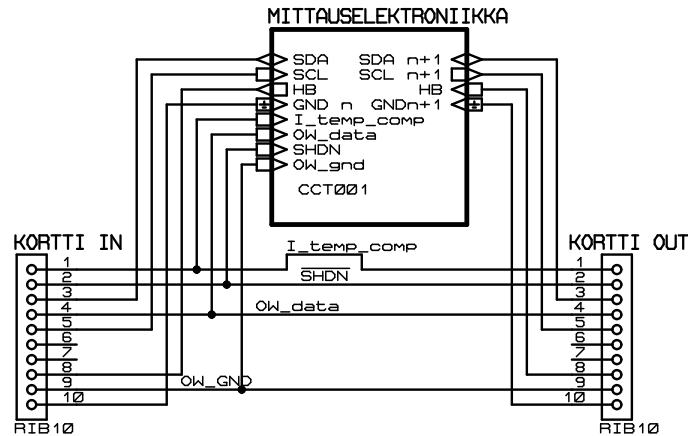
\overline{SHDN} signaali lisättiin järjestelmään jälkitoteutuksena, koska MAX11068 piireissä esiintyi tiloja joita ei pystynyt poistamaan pelkästään I2C komennoilla, vaan jotka vaativat piirien sähkönsyötön katkaisemista. \overline{SHDN} signaali toteuttaa tämän sammuttamalla piirin sisäisen jänniteregulaattorin. MAX11068 \overline{SHDN} pinni kestää 60 V jännitteen, joten tämän signaalin logiikkatasona käytettiin +12 V:a, jotta signaali olisi paremmin immuuni häiriöille kuin, mitä mikrokontrollerin 3,3 V:n I/O jännite olisi sallinut.

Lisäksi \overline{SHDN} signaali erotettiin isäntälaitteen järjestelmistä vahvasti, sillä se koskee ainoana signaalina mittausketjun jokaiseen laitteeseen, jolloin minkä tahansa MAX11068 piirin rikkoontuminen voi aiheuttaa linjaan jännitepiikin joka rikkoisi isäntälaitteen mikrokontrollerin. Muut signaalit koskevat suoraan joko vain ensimmäiseen laitteeseen, tai koskevat potentiaalisin ylijännitelähteisiin suhteellisen suurten vastusten kautta.

3.9 Tietoliikenne

Korttien tietoliikenne kulkee kortilta kortille 10 johtoosessa nauhakaapelissa. Kaapelissa kulkevat seuraavat väylät onewire, I2C ja seuraavat signaalit I_temp_comp ,

\overline{SHDN} , ja käyttämättömänä kulkee myös MAX11068:n heartbeat signaali. Tietoliikenteen rakennetta on esitetty kuvassa 3.18



Kuva 3.18: Tietoliikenteen kytkennät

I_temp_comp , \overline{SHDN} ja onewire väylä kulkevat suoraan kortilta toiselle kortin liittimien kautta. kortin I2C väylä ja hearbeat signaali välittyvät MAX11068 piiriin kautta. Alkuperäiseen suunnitelmaan kuului että korteilla olisi ollut jokaisella oma muista erotettu maa

3.9.1 MAX11068 tietoliikenne

MAX11068 piirien kanssa kommunikoidaan I2C väylällä, jonka piirit välittävät toinen toisilleen. I2C väylä tarvitsee 3 johtoa kaapelista maata, kelloa ja dataa varten. I2C väylä on open drain tyyppinen, jolloin käyttöjännitteeseen kytketyt vastukset vetävät linjan ylös. Kun laite haluaa antaa 0 signaalin, transistori vetää linjan alas. Tavallisesti tämäntyyppinen ratkaisu ei sovellu muihin kuin pieniin verkkoihin, sillä linjan kapasitanssi ja signaalin nousuaika kasvavat linjan pituuden kasvaessa. Myös 1 signaalin ajoimpedanssi on kohtalaisen suuri jolloin pitkiin johtoihin kytkeytyvien häiriöiden vaikutus korostuu. MAX11068 ratkaisee nämä ongelmat puskuroimalla väylän. Jokaisella piirillä on kaksi I2C porttia joista toinen ottaa viestejä vastaan isäntälaitteelta ja toinen portti välittää nämä viestit eteenpäin muille yksiköille. Tällöin yhden portin näkemä väylän pituus pysyy kohtuullisen pienenä. I2C väylän kommunikaatio tapahtuu seuraavasti: Väylän isäntä lähettää 8-bittisen osoitteen, jossa vähiten merkitsevä bitti määrää onko kyseessä luku vai kirjoitus operaatio. Bitti on 1 jos kyseessä on lukuoperaatio ja 0 jos tarkoituksena on kirjoittaa laitteeseen. 7 muuta bittiä ovat osoitebittejä jotka yksilöivät piiriin jolle komento on

tarkoitettu. MAX11068 välittävät viestit toisilleen. Dataa kirjoittaessa alempaan I2C porttiin lähetetään dataa ja piiri lähettää tämän dataviestin ylemmstä I2C portistaan Seuraavan mittausyksikön alempaan I2C porttiin. Dataa lukiessa tämä tapahtuu päinvastoin.

Kun piireistä halutaan lukea dataa, täytyy lukuoperaatio suorittaa kaikille piireille yhtä aikaa. Piirit lähettävät datansa ketjussa Isäntälaitteelle ja loppuun liitetään tarkistussumma luku-operaation onnistumisen varmistamiseksi.

I2C väylässä on vaarana, että väylä jumittuu kommunikaativirheen surauksena. MAX11068:ssa tämä ongelma on torjuttu asettamalla SCL signaalille aikakatkaissu. Jos piiri havaitsee, että sen SCLu pinnin tila on ollut muuttumaton 28 ms, se resetoit I2C laitteensa tilan palaten valmiiseen kommunikaatiotilaan. Tämä ei kuitenkaan käytännössä toimi kaikissa tilanteissa ja toisinaan väylä jää jumiin kunnes piirin sähkö on katkaistu. Tätä tilannetta varten jouduttiin \overline{SHDN} signaali johdottamaan väylään jälkikäteen. \overline{SHDN} sammuttaa piirin sisäisen regulaattorin joka vastaa sähköön katkaisemista piiriltä.

3.9.2 Lämpömittarien tietoliikenne

Lämpömittarien lukeminen tapahtuu onewire väylän kautta. Onewire tarvitsee kaksi johtoa maan ja datan. Koska korteilla ei ole muuta yhteistä maata, kuin hyvin häiriöinen tehosyötön maa, on lämpömittarien dataväylälle erotettu nauhakaapelista oma maajohto datajohdon lisäksi. STM32F100RB:ssä ei ole onewire laitetta, ja onewire väylän toteuttaminen ohjelmallisesti on työlästä tarkkojen ajoitusten suhteen, joten onewire väylän toteutuksessa käytetään DS2480B sarjaportti-onewire tulkkia. DS2480B kääntää sarjaportista lähetetyn data onewire protokollan mukaiseen formaattiin ja lukee vastaukset väylältä ja lähettää ne takaisin mikrokontrollerille. Lisäksi DS2480B ajaa linjaa aktiivisesti normaalin passiivisen ylösvetovastuksen sijasta jolloin väylän pituus maksimoituu. Onewire-väylän pituutta rajoittaa väylän kapasitanssi, joka koostuu johdotuksen kapasitanssista ja väylän laitteiden I/O porttien kapasitansseista. Maximin onewire ohjeessa [6] mainitaan että, yksi onewire-orja lisää väylään kapasitanssin, joka vastaa 0,5 m pituisen CAT-5 kaapelin kapasitanssia. Eli 5 metriä CAT-5 kaapelia ja 10 onewire orjaa vastaa 10 m onewire väylää. Väyläkapasitanssin lisäksi väylän pituus riippuu sitä ajavan onewire isännän toteutuksesta. Jos väylä on toteutettu yksinkertaisesti ylösvetovastuksella ja alasvetotransistorilla on maksimi väylän pituus 200 m paremmalla ajurilla kuten esimerkiksi DS2480B:llä tai aktiivisella ylösvedolla tämä pituus voidaan tuplata 500 m:n CAT-5 kaapelia käyttäen.

Mittausjärjestelmän väylä ei käytä CAT-5 kaapelia vaan nauhakaapelia. kahden laitteen välisen kaapelin pituus on noin 1 m ja laitteita on ketjussa maksimissaan 31, joten väylän pituuden pitäisi olla hyvin rajojen puitteissa. Vaikka nauhakaapeli

todennäköisesti onkin tiedonkulun kannalta huomattavasti CAT-5 kaapelia huonompaa.

Käytännössä onewire väylä toimii kuitenkin todella huonosti. Alkuperäinen testaaminen tehtiin 4 laitteen ketjulla, joka toimi hyvin. 4 laitetta on myös maksimi pituus jolla onewire vielä toimii ilman suurempia ongelmia. onewire isännän viestit kulkevat väylässä hyvin, mutta laitteiden lukeminen on epävarmaa. DS18B20 lämpömittarit ovat hyvin herkkiä pienille häiriöille piirejä luettaessa. Kun onewire väylältä luetaan bitti isäntä vetää linja alas $1 - 15 \mu s$, jos orja haluaa kirjoittaa linjalle 1 se ei tee mitään, jos se taas haluaa kirjoittaa 0, orja vetää linjan alas $60 \mu s$: ajaksi. Jos väylällä on pieniäkin häiriöitä isännän lähettämän aloituspulssin reunojen aikana, tulkitsee DS18B20 yhden aloituspulssin helposti kahdeksi aloituspulssiksi ja lähettää sisäisestä siirtorekisteristään yhden bitin sijasta 2 bittiä jolloin loppukommunikaatio ei tarkoita enää mitään järkevää. Ongelma esiintyy tietyissä fyysisissä kohdissa väylää ja sen vakavuus vaihtelee ajan mukaan. Suuresta osasta väylää ja akkuja lämpötilamittaus onnistuu kohtuullisen hyvin, mutta tietyistä väylän osista lämpömittausta ei vain yksinkertaisesti saatu toimimaan.

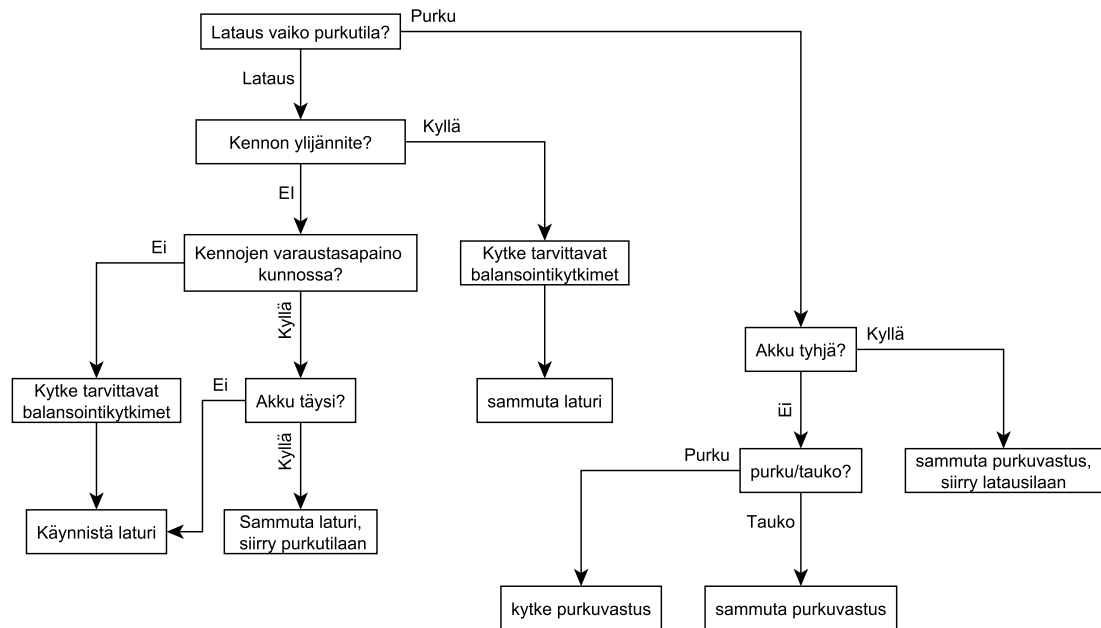
3.10 Ohjausyksikön ohjelma

Ohjausyksikön ohjelma huolehtii akkujen syklityksestä, mittaustulosten, lukemisesta ja tiedon eteenpäin lähettämisestä ja mahdollisuuksien mukaan virheiden ja poikkeustilanteiden korjaamisesta. Keskeytysten käyttämistä pyrittiin pitämään minimissä, jotta ohjelman suoritus pysyisi yksinkertaisen, eikä hyppisi milloin minnekin. Lisäksi keskeytyksillä ei useinkaan olisi saavuttanut mitään hyötyä pollaamiseen verrattuna, sillä ohjelma voi edetä vasta vastauksen saavuttua järjestelmästä, ja ohjelma olisi joka tapauksessa jouduttu pysäyttämään vastauksen odottamisen ajaksi. Keskeytyksiä kuitenkin käytetään, ohjelman osissa, jotka lähettävät dataa eteenpäin PC:lle, lämpömittarin kommunikaation kanssa ja ohjelman sisäisen kellon päivitykseen, joka on ohjelman ainoa aikakriittinen osa.

Ohjelmassa on kaksi päävaihetta datan lukeminen testikorteilta ja akkujen hallinnointi ja syklaaminen. Pääohjelman sisällä erillisenä muusta ohjelmasta toimii tilakone, joka käsittelee lämpömittareiden lukemiseen vaadittavat operaatiot.

Akkujen tiedot luetaan korteista yhdellä suurella lukuoperaatiolla ja ne tallennetaan ohjelman sisäiseen tietokantaan. Lämpömittareita lukeva tilakone päivittää tietokannan lämpötiladataa omaan tahtiinsa. Lukuvaiheen jälkeen data tallennetaan lähetyspuskuriin, josta se lähetetään sarjaportin kautta tietokoneelle tallennettavaksi. Seuraavaksi säädetään latausvirta akkujen keskimääräisen lämpötilan mukaan. Lämpötila tulisi säätää kaikkein alhaisimman lämpötilan mukaan, mutta koska joidenkin akkujen lämpötilalukemiin ei voi luottaa, on keskimääräisen lämpötilan tarkastelu toiseksi paras vaihtoehto. Lopuksi ajetaan akkujen hallinnointifunktio, joka

ohjaa testikortteja tietokantaan tallennettujen tietojen perusteella. Funktion vuokaavio on esitetty kuvassa 3.19.



Kuva 3.19: Akun hallinnointifunktion vuokaavio

Akkutietokantaan on tallennettu tieto siitä mitä akulle pitäisi tehdä, tarvitseeko akku latausta vaiko purkua. Ohjelman aluksi kaikki akut alustetaan lataustilaan. Purkutilassa tutkitaan ensimmäiseksi akun mitatut kennojännitteet, jos jokin kennojännitteistä on pienempi kuin asetettu alajänniteraja, purkuvastus sammutetaan ja akku merkitään latausta tarvitseväksi.

Purkamisen tauotusta valvoo kaikille akuille yhteinen taukokello. Jonka tilaa funktio tutkii, ja tämän perusteella kuorma kytketään päälle tai pois päältä.

Jos akku on lataustilassa, tutkitaan ensiksi onko jossakin kennossa ylijännitettä. Jos ylijännite havaitaan, laturi sammutetaan ja ylilatautunutta kennoa puretaan balansointikytkimillä kunnes sen jännite laskee normaalille tasolle.

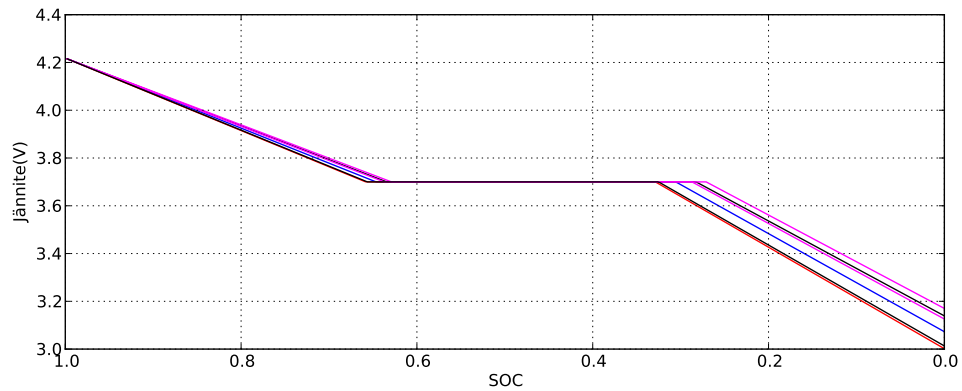
Seuraavaksi tutkitaan kennojen varaustasapainoa, jos kennojen jännitteet ovat tarpeeksi korkeita ja eroavat toisistaan tarpeeksi, kytketään tarvittavat balansointikytkimet päälle ja käynnistetään laturi.

Jos varaustasapaino on kunnossa, tutkitaan onko akku täynnä (kennojännitteet ovat tarpeeksi korkeat, varaustasapaino on kunnossa ja latausvirta on pudonnut tarpeeksi alhaiseen arvoon). Jos akku on täynnä, laturi sammutetaan ja akun tila merkitään purkutilaksi.

Funktioon oli alun perin tarkoitus toteuttaa akkukohtainen ali- ja ylälämpöraja, funktion lataus- ja purkuhaaroihin, mutta koska lämpömittarien toiminta oli epä-

luotettavaa, nämä ominaisuudet poistettiin.

Kennojen balansoinnissa on otettava huomioon, että jännite ei kuvaa suoraan kennon varaustilaa, ja täten kennojännitteet ovat samat vain tietyssä pisteessä, jossa kennojännitteet tasataan. Kun lipo kennon jännite on 4,2 V on kennon SOC 100% ja kennojännitteen ollessa 3 V on SOC 0%. Kuvassa 3.20 on esitetty akun kennojännitteiden simuloitu käyttäytyminen, kun täyttä akkua puretaan kunnes ensimmäisen kennon jännite saavuttaa 3 V. Aluksi kaikkien kennojen jännite on 4,2 V ja SOC 100%, mutta koska kennojen kapasiteetit eroavat toisistaan hieman, tietyn varauksen Q purkaminen aiheuttaa eri suuret muutokset kennojen SOC:ssa. Tästä syystä kennojen SOC ja kennojännitteet eroavat toisistaan, melko huomattavastikin, kun kapasiteetiltaan pienin kenno saavuttaa 0%:n SOC:n



Kuva 3.20: Akuston jänniteiden simuloitu käyttäytyminen yhden kennon SOC tilan mukaan

Erot kennojännitteissä kuvaavat merkityksellisiä eroja SOC:ssa, vain kun SOC-luku on korkea. Tästä syystä, balansoinnin toiminta tulee rajoittaa latauksen loppuun. Jos kennoja yritetään balansoida koko latauksen ajalta yksinkertaisella algoritmilla, joka katsoo vain kennojännitteitä eikä muista kennojen lataushistoriaa, päädytään pienillä SOC-luvuilla purkamaan kapasiteetiltaan suurimpia kennoja liikaa, jolloin niiden SOC jää pienistä kennoista jälkeen latauksen loppuvaiheilla. Toinen hyöty, joka saavutetaan rajoittamalla balansointi akun lataamisen loppuvaiheille, on se että latausvirta on latauksen lopussa pienempi, jolloin kennojen sisäresistanssien erot eivät tuo virhettä kennojännitteiden mittaamiseen.

4. TULOKSET

Järjestelmän lukemat mittaustulokset lähetetään tietokoneelle sarjaporttia pitkin. Mittaustietokoneessa ajetaan python-skriptiä, joka nauhoittaa tiedon kovalevylle, ja näyttää viimeisimmät mittaustulokset tietokoneen ruudulla, jolloin virhetilanteet on helppo huomata. Tietokone tallentaa akuista mitatun datan tekstitiedostoihin. Yhteen tiedostoon tallennetaan 2 tunnin ajalta dataa joka tarkoittaa 7200 mittauspistettä. Yhdelle riville tallennetaan mittausketjun akkujen jännitteet virrat ja lämpötilat. Mitattu raakadata sisältää virheitä, jotka johtuvat virheistä sarjaportin tietoliikenteessä ja testilaitteiston uudelleenkäynnistymisistä ohjelmistovirheiden yhteydessä. Lisäksi datan lukeminen suoraan suuresta tekstitiedosto määrästä on ohjelmallisesti monimutkaista.

Datan manipulointiin, laskentaan ja visualisointiin on käytetty Python XY pakettia ja sen kirjastoja.

Raakadata esiprosessoidaan HDF5 tietokannaksi käyttäen python xy:n h5py[7] kirjastoa. HDF5 tiedostomuoto ja kirjasto mahdollistaa suuren datamäärän käsittelyn kätevästi kiintolevyllä ilman, että tietokoneen keskusmuisti loppuu kesken.

Esiprosessoinnissa datan järjestyys tutkitaan, esimerkiksi mahdottomat mittausarvot suodatetaan pois. Lisäksi mittausdatasta lasketaan akkujen varaustila integroimalla akun virtaa ja analyysin kannalta mielenkiintoiset kohdat tallennetaan muistiin, jotta niihin palaaminen olisi myöhemmin helpompaa. Näitä kohtia ovat akun latauksen ja purkamisen aloittaminen, sekä suurent virran muutokset purkuvastusta kytkettäessä kuorma ja taukotilan välillä.

Kennojen resitanssi riippuu varaustilasta. Seuraavassa kappaleessa lasketut resitanssit on laskettu jännitteen muutoksen perusteella, kun ladatun akun kuormavastus kytketään päälle ensimmäisen kerran.

4.1 Mittaustulokset

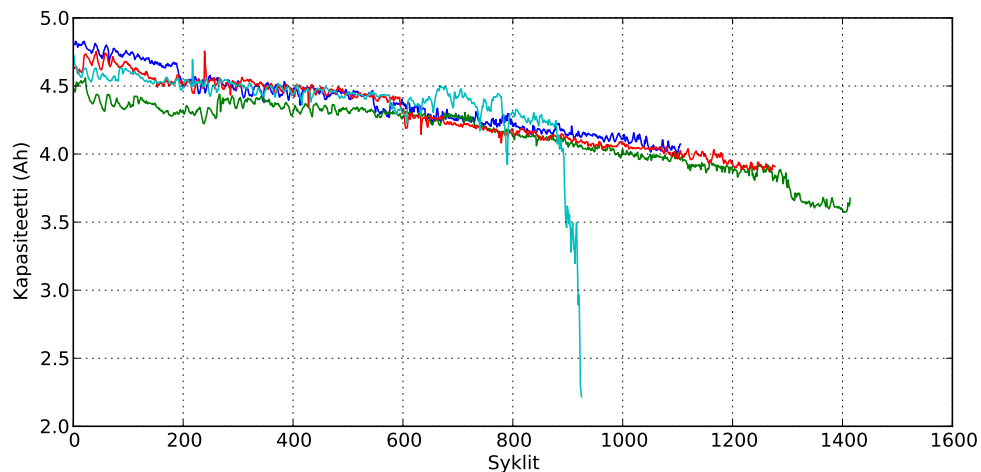
Testejä ajettaessa yksi kappale Sanyan Energyn ja Shida battery technologyn akkuja rikkontui järjestelmän virheen vuoksi. Sanyan energyn tapauksessa purkuvastusta ohjaava fettikytkin rikkontui ja akku tyhjeni täysin. Shidan akkua hallinoineesta kortista rikkontui laturi jonka kautta akku tyhjentyi täysin.

Akut jakaantuivat kahteen ryhmään, joista toinen ryhmä pysyi käyttökelpoisena yli 1000 purkusyklin ajan. Toinen ryhmä menetti kapasiteettinsa, joko aivan täysin,

tai siten että jäljelle jäi vain 10 – 20% alkuperäisestä kapasiteetista.

Akkujen syklityksessä oli kaksi vaihetta. Ensimmäisessä vaiheessa kaikkien akkujen kuormana oli $400\text{ m}\Omega$:n vastus ja akkua kuormitettiin 30 s jonka jälkeen oli 10 s tauko, kunnes akku oli tyhjentynyt. Tätä vaihetta kutsutaan Syklitysrutiini 1:ksi Toisessa vaiheessa osalle akuista vaihdettiin kuormaksi $275\text{ m}\Omega$ ja ajoituksiksi vaihdettiin 30 s kuormitusta ja 180 s taukoa. Tätä Vaihetta kutsutaan syklitysrutiini 2:ksi Tämä tehtiin, koska alkuperäisestä suunnitelmasta poiketen lämpömittarien tietoihin ei voinut luottaa tarpeeksi jotta akuille olisi voinut tottuttaa yllämpösuojauksen.

Kuvassa 4.1 on esitetty Shida battery technologyn CEL1044129D kennon kapasiteetti lataus-purkusyklien funktiona. Nämä kennot laitettiin testilaitteistoon ensimmäisinä, jolloin laitteistoa ei vielä oltu kalibroitu, joka on syynä alkukapasiteetin suurelle hajonnalle.

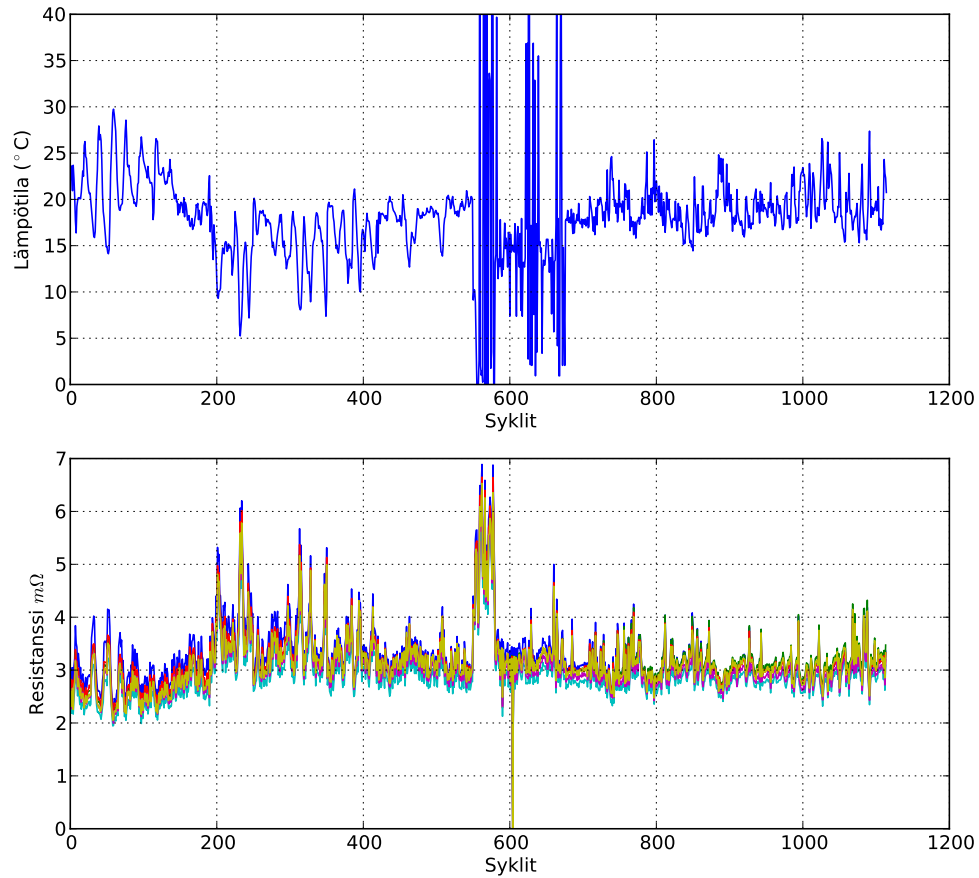


Kuva 4.1: Shida battery technologyn CEL1044129D kestävyys

900 syklin kohdalla hiipuvan akun kapasiteetin menetys ei ole todellista vaan johtuu mittakortin purkuvirranmittausosion rikkoontumisesta.

Kennon nimellisen lähtökapasiteetin ollessa 5 Ah on kennon kapasiteetista jäljellä 80% 4 Ah:n kohdalla CEL1044129D saavuttaa tämän pisteen noin 1100 purkusyklin jälkeen, jota voidaan pitää erittäin hyvänä tuloksena. Akkujen lämpötila purkusyklin lopuksi on keskimäärin ollut $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja loppulämpötila on vaihdellut $30 - 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ välillä käyden hyvin harvoin $50\text{ }^{\circ}\text{C}$:ssa. Lämpenemä on pysytellyt $20\text{ }^{\circ}\text{C}$:ssa ja kuorman lisääminen ei ole oleellisesti vaikuttanut siihen. Kennojen resistanssit ovat pysyneet hyvin samanlaisina eri kennojen kesken, syklityksen aikana. Kuvassa 4.2 on esitetty akun kennojen resistanssin käyttäytymistä syklityksen edetessä. Myös akun pinta-lämpötila on esitetty. Kuvasta nähdään, että akun resistanssin ja lämpötilan välillä on melko voimakas riippuvuus. Resistanssi on kennojen kesken lähes sama, ja ei

muutu oleellisesti sykliuvun kasvaessa vaan pysyttelee $3 - 4 \text{ m}\Omega$ välissä.



Kuva 4.2: CEL1044129D:n kennoresistanssien ja lämpötilan yhteys

Kuvassa 4.3 on esitetty toinen kennomalli Shida battery technologyltä. Tämä akkupaketti perustuu 8043150HP kennoon. Dataa on saatu vain 3 akusta sillä testikortin laturin rikkoontumisen vuoksi yksi tämän tyyppin akuista rikkoontui. Akkujen alkukapasiteetissa näkyvä ero johtuu akkujen erilaisesta kuormitusvirrasta. Punainen käyrä kuvaa akkua jota on kuormitettu kuormitettu $275 \text{ m}\Omega$ kuormalla, kun kahden muun akun kuormana on $400 \text{ m}\Omega$ purkuvastus. Sinisessä kuvaajassa alun vaihtelu kapasiteetissa johtuu ympäristölämpötilan vaihtelusta. Sillä se laitettiin testiin ennen akkujen lämmityksen rakentamista. Lämpötilan ja kapasiteetin riippuvuussuhde käy ilmi kuvasta 4.4

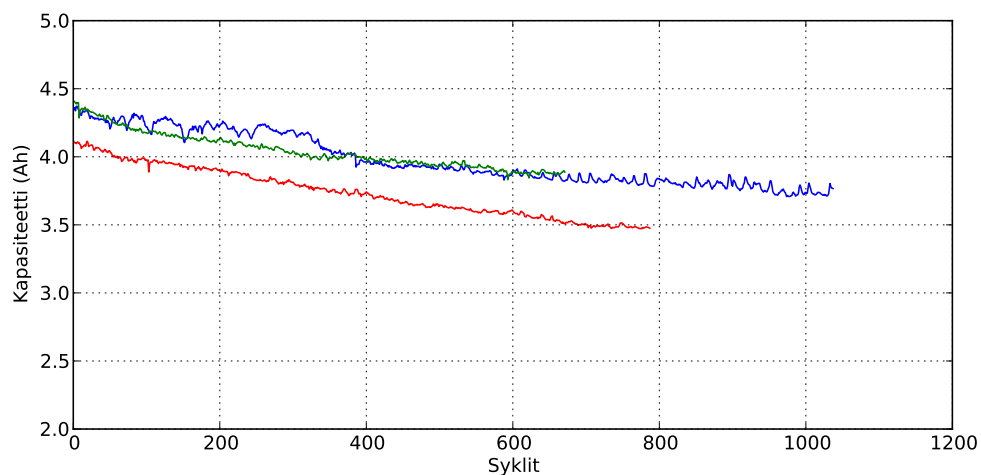
Vain yksi akuista on saavuttanut tuhannen syklin rajan, jolloin sen kapasiteetti on pudonnut alkutilanteeseen verrattuna 14%, extrapoloimalla voidaan arvioida, että myös toinen akuista tulisi käyttäytymään samalla tavalla jos syklausta jatkettaisiin. Kolmas akku on menettänyt 800 sykliin mennessä 15% kapasiteetistaan. 800

syklin kohdalla pienemmällä kuormituksella olleet akut ovat menettäneet alkukapasiteetistaan 13,3% joten, suurempi kuorma ei ole merkittävästi rasittanut akkua normaalikuormaa enempää. Kennojen resistanssi vaihtelee kennojen välillä hyvin vähän. Kennoresistanssi on noin $3\text{ m}\Omega$ ja sen vaihtelu eri kennojen kesken on vähemmän kuin $0,5\text{ m}\Omega$

Järkevää lämpötiladataa on saatu vain sinisen käyrän kuvaamasta akusta. Akun lämpenemä purkusyklin aikana on vaihdellut $30 - 20\text{ }^\circ\text{C}$ välillä. Lämpenemä on ollut sylityksen alussa $30\text{ }^\circ\text{C}$, jolloin purkusykli koostui 30 s kuormitusjaksosta ja 10 s taukojaksosta. Kovennetulla $275\text{ m}\Omega$ kuormalla purkusyклиä ajettiin 30 s ja 180 s kuormitus, ja tauko -jaksoilla. Tällöin lämpenemä laski $20\text{ }^\circ\text{C}$ n

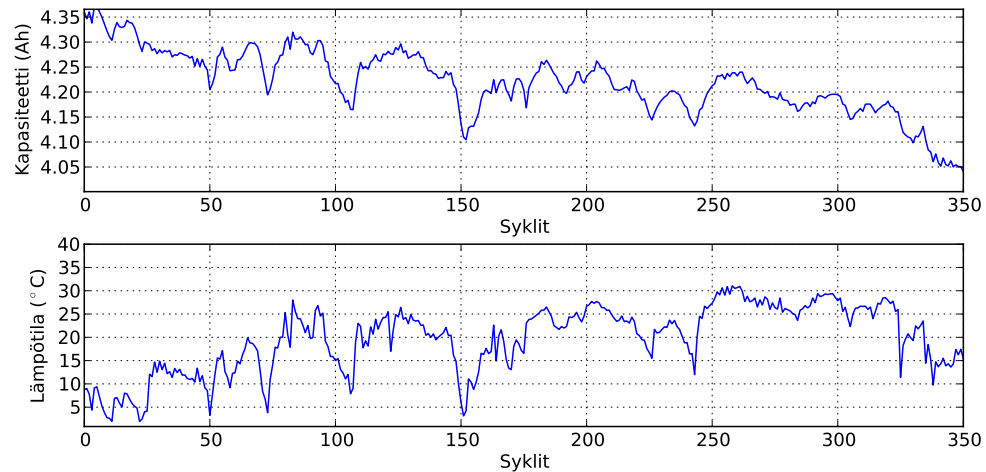
Akun absoluuttinen lämpötila purkusyklin lopussa on ollut ensimmäisen syklitysrutiinin aikana $50\text{ }^\circ\text{C}$ ja toisen syklitysrutiinin aikana $40\text{ }^\circ\text{C}$

Kovemmalla kuormituksella olleen punaisen punaisen käyrän kuvaaman akun kapasiteetti on ollut syklityksen aluksi pienempi, kuin pienemmällä kuormalla kuormitettujen akkujen (4,1 Ah:a verrattuna 4,35 Ah:n). Koska tämän kennotyyppin akuissa vain yhdessä oli kovennettu kuorma, on vaikeaa sanoa johtuuko tämä akkujen yksittäisistä eroista, vaiko kovemmasta kuormasta. Muiden testissä olleiden akkujen kohdalla suuremmalla kuormalla ei havaittu suurta vaikutusta kapasiteettiin.



Kuva 4.3: Shida battery technologyn 8043150HP:n kestävyys

Kuvassa 4.5 esitetään Sanyan energy SY1077458SXX kennoon perustuvan akun syklikestävyys. Yksi akuista tuhoutui viallisen purkuvastuksen kytkimen vuoksi 400 syklin kohdalla. Kaksi akkua on kestänyt syklitystä hyvin. Akkujen alkukapasiteetti on 4,8 Ah, johon verrattuna kapasiteetti on laskenut 18% 1350 syklin kohdalla ja hieman paremman akun tapauksessa 11% 1300 sykliin mennessä. Parhaiten kapasiteettinsa säilyttäneen akun kuormavastus on ollut koko testin ajan $400\text{ m}\Omega$ ja



Kuva 4.4: Kapasiteetin vaihtelun yhteys lämpötilaan

kahden muun akun kuormaksi vaihdettiin $275\text{ m}\Omega$ 517 ja 660 syklin kohdalla. Kahden parhaiten kestäneen akun kapasiteetit alkavat eroamaan toisistaan 660 syklin kohdalla, joten on mahdollista, että rajumpi kuormitus on nopeuttanut kapasiteetin pienenemistä. Koska aineisto koostuu vain kahdesta akusta ei, tästä voida kuitenkaan olla varmoja ja ero saattaa myös johtua akkuyksilöiden eroista.

Akkujen lämpenemä on vaihdellut syklitysrutiinista riippuen välillä $30 - 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Akkujen pintalämpötila purkusyklin lopussa on ollut $40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

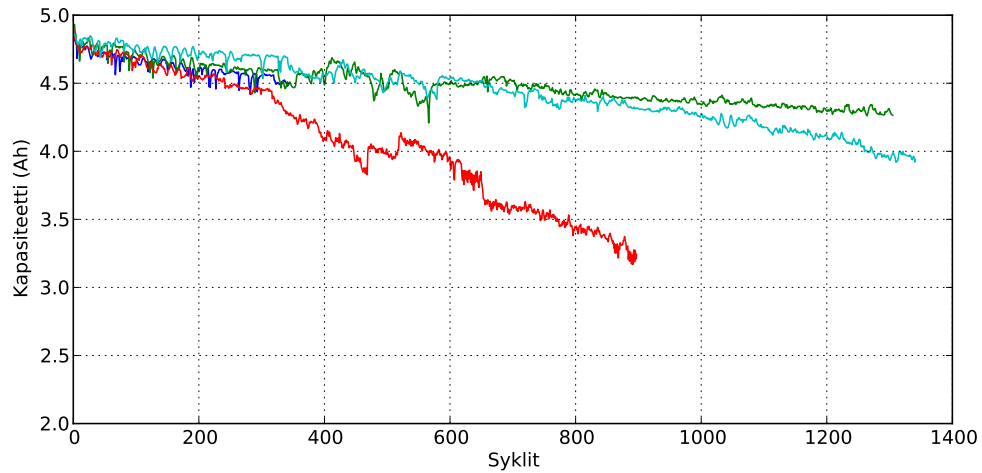
Punaisen käyrän kuvaaman akku alkaa vanhemaan muita akkuja nopeammin 300 syklin kohdalla. Syynä tähän voi olla jokin järjestelmässä tapahtunut virhe, joka on jostain syystä rikkonut yhden kennon akustosta. Suoria todisteita tälle ei kuitenkaan mittausdatasta löydy, mutta tilanne on myös saattanut jäädä tallentumatta dataan.

syklin 300 kohdalla punaisen käyrän kuvaaman akun kuudennen kennon resistanssi alkaa kasvamaan paketin muihin kennoihin verrattuna ja on lopulta 40% muita kennoja suurempi.

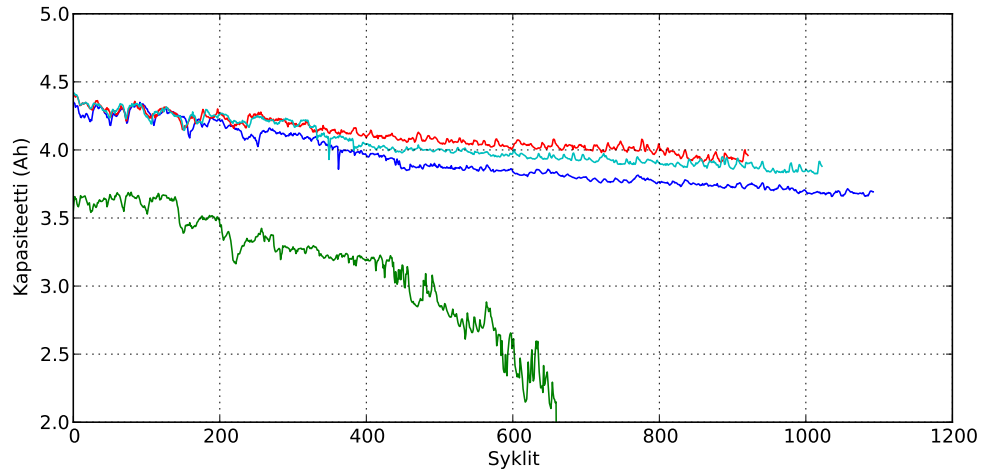
Muiden akkujen kennesistanssit ovat noin $3\text{ m}\Omega$

Kuvassa 4.6 on esitetty Collection power sourcesin CPS-8043150SP-25C kennoon perustuvien akkujen syklikestävyyttä. Tämä kennotyyppin kanssa kokeiltiin myös, vaikuttaako akkujen kytkeminen jäähdyssiiliin akun elinikään. Jäähdyssiiliin kytkemistä varten kaksi akkua neljästä purettiin kennoiksi ja nämä kennot aseteltiin alumiinisen jäähdytyssiilin sisälle. Yksi akun kennoista vaurioitui akkua purettaessa ja tämä näkyy kyseisen akun alhaisena lähtökapasiteettina ja nopeana vanhenemisena. Muut kolme akkua ovat kestäneet syklitystä hyvin.

Kaksi ylintä kuvaajaa (punainen ja syaani) kuvaavat akkuja, jotka jätettiin vertailukohdaksi jäähdytyssiiliin kytketyille akuille. Punaisen käyrän kuvaamaan akun kuorma vaihdettiin 320 syklin kohdalla $400\text{ m}\Omega$:sta $275\text{ m}\Omega$:n, mutta tämä ei ole



Kuva 4.5: Sanyo energyn SY1077458SXX kennon syklikestävyys



Kuva 4.6: Collection power sourcesin CPS-8043150SP-25C:n syklikestävyys

vaikuttanut kapasiteetin heikkenemiseen olennaisesti. Syyainin kuvaajan akun kuormana on ollut koko testin ajan $400\text{ m}\Omega$ vastus. Sininen kuvaaja esittää jäähdytysiliin kytkettyä akkua, jonka kuormana on ollut $400\text{ m}\Omega$ vastus. Jäähdytysili ei ole tuonut akulle lisää kestävyyttä ja akku on kestänyt syklitystä hieman huonommin, kuin normaalisti jätetyt vertailuakut. On kuitenkin vaikea sanoa yhden yksilön perusteella, onko jäähdyssiilistä ollut haittaa vai onko kyseinen akkuyksilö vain ollut lähtökohtaisesti huonompi.

900 syklin kohdalla akkujen kapasiteetti on alkutilanteeseen verrattuna vähentynyt 11%, 12% ja 15%.

Vertailuakkujen lämpötila absoluuttinen, purkusyklin lopussa ennen kovemman syklin aloittamista, on akkujen pinnalta mitattuna ollut $40 - 53\text{ }^{\circ}\text{C}$ välillä. Syklin

koventamisen jälkeen kovemmin kuormitetun akun loppulämpötila on keskimäärin 45 °C vaihdellen 40 °C – 50 °C välillä. normaalilla $400\text{ m}\Omega$ kuormalla kuormitetun akun lämpötila on keskimäärin 40 °C vaihdellen 35 °C – 45 °C välillä.

Vertailuakkujen lämpenemät ovat ensimmäisellä syklitysrutiinilla 30 °C ja toisella syklitysrutiinilla 22 °C ja 15 °C

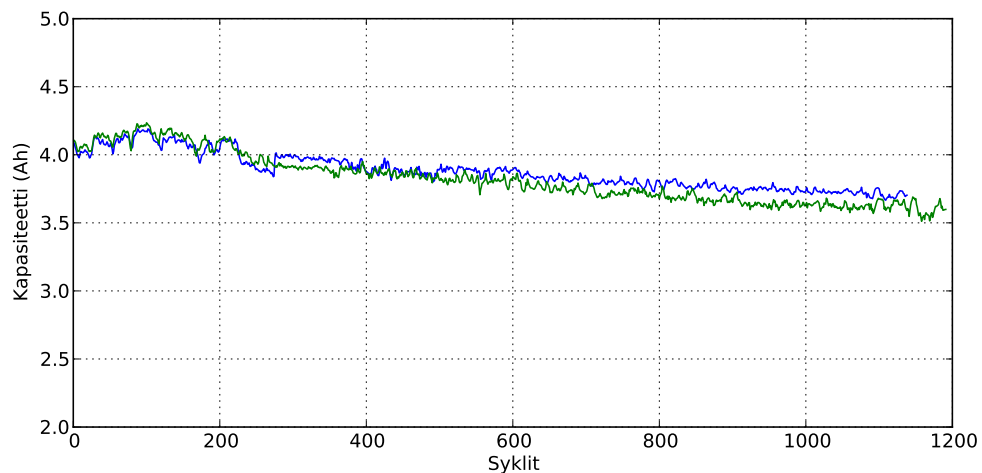
Jäähdytysiin kytkettyjen akkujen absoluuttinen lämpötila jäähdytysiin pinnalta mitattuna ensimmäisen syklitysrutiinin aikana on ollut alle 45 °C ja toisen syklitysrutiinin aikana lämpötilat ovat olleet keskimäärin 28 °C

Lämpenemä on ollut molemmille jäähdytetyille akuille keskimäärin 10 °C

Poislukien akku, jonka kenno on vahingoittunut, kennojen resitanssit ovat noin $3\text{ m}\Omega$ ja kennokohtaiset erot kennoresistanssissa ovat hyvin pieniä.

Vahingoittuneen kennon paketissa vahingoittuneen kennon (kenno numero 6) resistanssi alkaa kasvamaan 200 syklin kohdalla ja on syklityksen lopussa $10\text{ m}\Omega$ vahingoittumattomien kennojen kennoresistanssin ollessa $3\text{ m}\Omega$

Kuvassa 4.7 on esitetty Kokamin SLPB11043140H4 kennoon perustuvien akkujen syklikestävyyttä. Kokamin akut ovat kestäneet syklitystä erittäin hyvin. 1100 syklin kohdalla akkujen alkukapasiteetista on kadonnut 9% ja 7%. Alkukapasiteetti 4 Ah poikkeaa kuitenkin huomattavasti nimellisestä kapasiteetista $4,8\text{ Ah}$



Kuva 4.7: Kokam SLPB11043140H4:n syklikestävyys

Kokamin akkujen mitatut lämpötilat eivät ole vertailukelpoisia muiden akkujen kanssa, koska näiden akkujen lämpötilat mitattiin paketin keskeltä, kun taas muiden akkujen lämpötilat mitattiin paketin sivuilta.

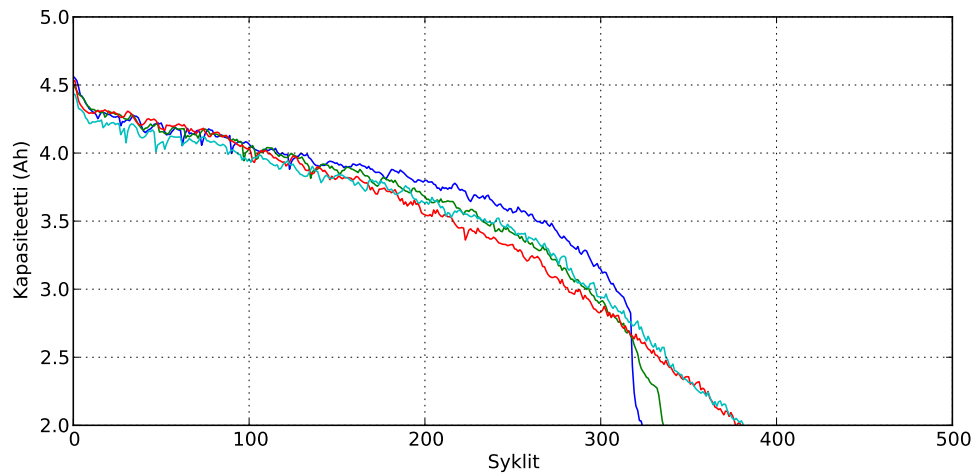
Syklitysrutiini 1 aikana, joka kokamin kohdalla oli voimassa syklien $0\text{--}370$ ajan, on akkujen lämpötila purkuvaiheen lopussa heitellyt voimakkaasti ja käynyt maksimissaan 71 °C ssa, joka on hyvin korkea.

Syklitysrutiini 2 aikana, jota on käytetty testin loppuajan, on $275\text{ m}\Omega$:lla kuormitetun vihreän käyrän kuvaaman akun loppulämpötila ollut keskimäärin $57\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $400\text{ m}\Omega$:lla kuormitetun akun lämpötila on pysytellyt keskimäärin $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ssa

Lämpenemät nousevat syklitysrutiini 1 aikana pahimmillaan $45\text{ }^{\circ}\text{C}$:n ja syklitysrutiini 2 aikana lämpenevät ovat normaalikuormitetulle akulle $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja kovemmin kuormitetulle $30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Kennojen resistanssit ovat yllättävän suuria ja niissä on yllättävät suuri hajonta. Kennoresistanssi on pienimmillään $4,5\text{ m}\Omega$ ja suurimmillaan $6\text{ m}\Omega$. Akkujen välillä ei ole oleellisia eroa ja lämpötilan pysyessä vakiona myös kennoresistanssit pysyvät lähes muuttumattomina.

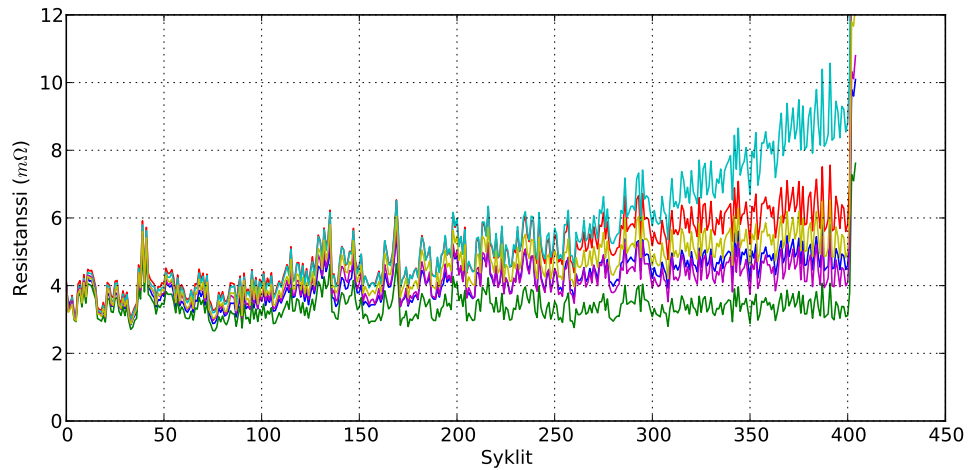
Everwin technologyn akut ovat vanhentuneet odotusten mukaisesti. Kuvassa 4.8 on esitetty akkujen kapasiteetti sykliä funktiona 20% kapasiteetin mentys on tapahtunut noin 200 syklin kohdalla. Tämän pisteen jälkeen kapasiteetin menetys alkaa myös kiihtymään akkujen vanhetessa entisestään. Näiden akkujen lämpötila on keskimäärin $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ purkusyklin lopussa ja akkujen lämpenemä $30 - 40\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Kuva 4.8: Everwin technology 8443129HP kennon syklikestävyys

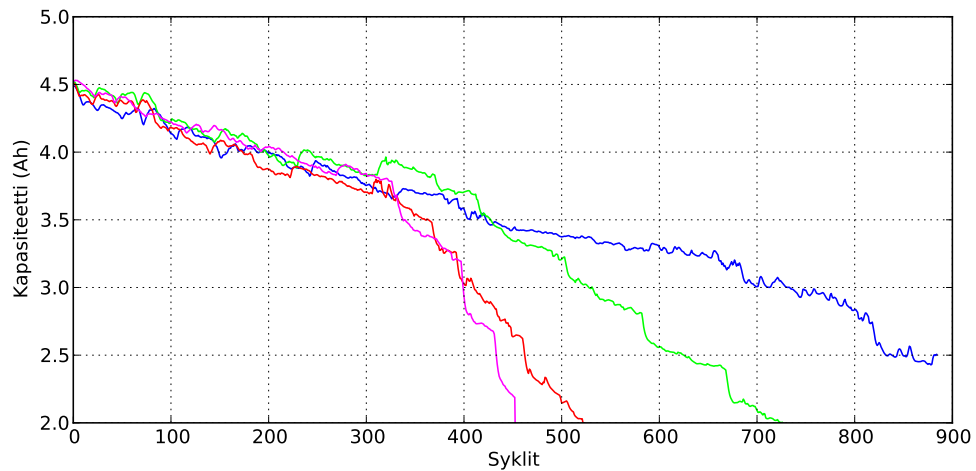
Akkujen kennoresistansseilla on melko selkeä kasvava trendi. Kuvassa 4.9 on esitetty yhden akun kennoresistanssien käyttäytyminen akun vanhetessa. Kennoista osan resistanssi kasvaa hiljalleen yli kaksinkertaiseksi muihin kennoihin verrattuna. Kasvava ero resistansseissa vaikeuttaa kennojen balansointia ja pakottaa lopettamaan akun purkamisen akun lähdejännitteen ja SOC:n ollessa vielä melko korkea, sillä kuormitettuna kennon jännite putoaa alajänniterajan alapuolelle.

Everwin technologylta tilattiin myös $50\text{ }^{\circ}\text{C}$:n akkuja, jotta nähtäisiin tuoko suurempi C-luku oleellista eroa akkujen kestävyys. Kuva 4.10 kuvaa tämän akun kestävyttä. Sininen ja vaaleanvihreä käyrä kuvaavat akkuja joiden kuormana on



Kuva 4.9: Everwin 25C akun kennoresistanssit

ollut $400\text{ m}\Omega$. Näiden akkujen kapasiteetti pudonnut 20% 390 ja 417 syklin kohdalla. Syklitysrutiini 1 vaihdettiin syklitysrutiini 2:n 300 syklin kohdalla, jossa eri kuormilla varustettujen akkujen kapasiteetit alkavat eroamaan toisistaan.



Kuva 4.10: Everwin technology 8544152XT kennon syklikestävyys

Akkujen lämpötiloissa on kohtalaisia eroja. Sinisen käyrän kuvaaman akun loppulämpötila on ollut syklitysrutiini 1:n aikana $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja syklitysrutiini 2:n aikana $33\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tämä akku on myös kestänyt syklitystä parhaiten

Muiden akkujen loppulämpötila on pysytellyt koko syklityksen ajan 50°C :n tuntumassa.

Kaikkien akkujen lämpenemät ovat olleet syklitysrutiini 1:n aikana $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja syklitysrutiini 2:n aikana $20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Kuten myös Everwin technologyn 25 C:n versiossa, akun vanhetessa kennoresistanssi alkaa kasvamaan ja poikkeamaan paketin muista kennoista. Sinisen käyrän kuvaaman akun kennoresistanssit ovat kasvaneet lähes samaan tahtiin ja tämä akun kapasiteetti on laskenutkin kaikkein hitaimmin. Muiden akkujen kohdalla yksi kennoista vanhenee muita nopeammin, vaikeuttaen balansointia ja pudottaen kapasiteettia. Kaksi nopeimmin vanhentunutta akkua ovat saaneet kuormakseen syklitysrutiini 2:n aikana $275\text{ m}\Omega$ ja näiden akkujen vanheneminen on selkeästi nopeutunut kuormaa ja syklitysrutiinia vaihdettaessa. Verrattuna 25 C:n kennoista rakennettuihin akkuihin 50 C:n akut ovat kuitenkin kestäneet syklitystä paremmin.

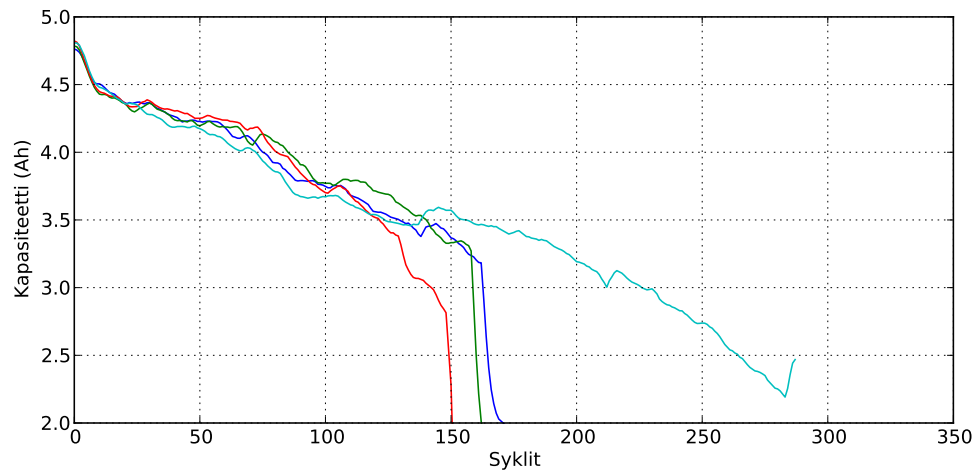
Kuvassa 4.11 on Esitetty Fullymaxin FB8244152 kennon syklikestävyys. Fullymaxin akkujen odotettiin olevan testien parhaimmistoa mutta, ennakko-odotukset eivät pitäneet paikkaansa. Fullymaxin akut ovat Suoriutuneet LiPo kemiaan perustuvista akuista kaikkein huonoiten. Akkujen kapasiteetti putoaa kaikkien akkujen tapauksessa 20% ennen 150 syklin saavuttamista. 3:n akun kapasiteetti putoaa tämän jälkeen hyvin nopeasti olemattomiin. Neljännen akun vanhetessa suhteellisen tasaisesti. Lyhyestä eliniästä johtuen Näitä akkuja kuormitettiin vain syklitysrutiini 1:llä ja $400\text{ m}\Omega$ kuormalla.

Akkujen absoluuttinen lämpötila purkusyklin lopussa on ollut keskimäärin $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ paitsi sinisen käyrän kuvaamalla akulla, jonka lämpötila purun lopussa on noussut jopa $70\text{ }^{\circ}\text{C}$:n asti.

Akkujen kennoresistanssit ovat syklityksen alussa $2 - 3\text{ m}\Omega$ välillä ja syklityksen edetessä kennoresistanssit kasvavat ja alkavat eroamaan toisistaan, joka selittää kapasiteetin putoamisen. Syaenin kuvaajan esittämässä akussa, kennoresistanssit ovat pysyneet keskenään melko hyvin yhtä suurina ($6 - 8\text{ m}\Omega$ syklityksen lopussa). Kun taas esimerkiksi sinisen kuvaajan kuvaaman akun kennoresistanssit sijoittuvat välille $3 - 10\text{ m}\Omega$.

General electronics batteryn:n akut olivat testin ainoita polymeerityyppisiä Li-FePo₄ tekniikkaan perustuvia akkuja. Kuvassa 4.12 On esitetty General electronics batteryn LF9550150SH33C kennoon perustuvien akkujen kapasiteetin käyttäytymistä akkujen vanhetessa. Akkuyksilöt ovat vanhentuneet hyvin eri tahtiin 20% kapasiteetin lasku on tapahtunut akusta riippuen 160, 230 ja 300 syklin kohdalla. Syklauksen alussa akkujen kennojännitteet olivat todella pahasti epätasapainossa. Tarkka SOC prosentti ei ole tiedossa. Mutta esimerkiksi sinisen käyrän kuvaaman akun kennojännitteet olivat syklityksen alussa seuraavat: 3,60, 3,58, 3,53, 3,46, 3,46, 3,40 Kennoista kaksi on lähes täynnä, kun taas yhden kennon jännite 3,40 V, joka LF9550150SH33C kennolla tarkoittaa noin 80% SOC:a.

Balansointijärjestelmä ei toimi kunnolla tällaisten jännite-erojen kanssa ja osa kennoista altistuu ylijännitteille syklityksen alussa. Yllättäen testin alussa ylijännitteille altistuneet kennot ja testin kuluessa nopeimmin vanhenevat kennot eivät



Kuva 4.11: Fullymax FB8244152:n syklikestävyys

kuitenkaan ole samoja, joten ilmeisesti ylijännite ei ole vahingoittanut kennoja paljoakaan. Tämä on melko yllättävää, sillä pahimmillaan joidenkin kennojen latausjännite on testin alussa noussut jopa 4 V:n, kennotyyppin sallitun maksimijännitteen ollessa 3,65 V

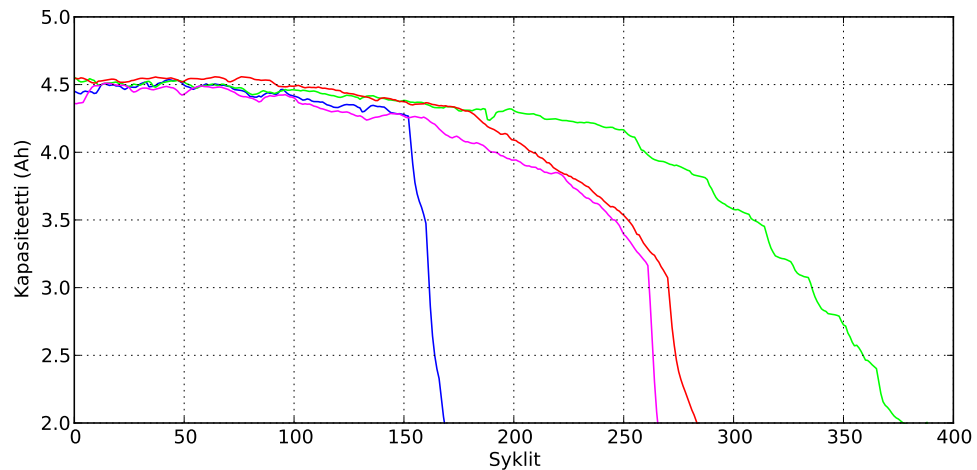
Akut ovat säilyttäneet kapasiteettinsa hyvin testin alussa, mutta ovat menettäneet kapasiteettinsa nopeasti 150 – 300 syklin välillä. Vanhenemisnopeudessa on jonkin verran hajontaa. Sinisen käyrän kuvaaman akun kapasiteetti on pudonnut 150 syklin jälkeen, jolloin akun kuormaa nostettiin, hyvin nopeasti.

Muut akut ovat vanhentuneet hitaammin, mutta kiihtyvällä tahdilla.

Akkujen kapasiteetti on laskenut allkutilanteeseen verrattuna 20% 160, 240, 240 ja 290 syklin kohdalla.

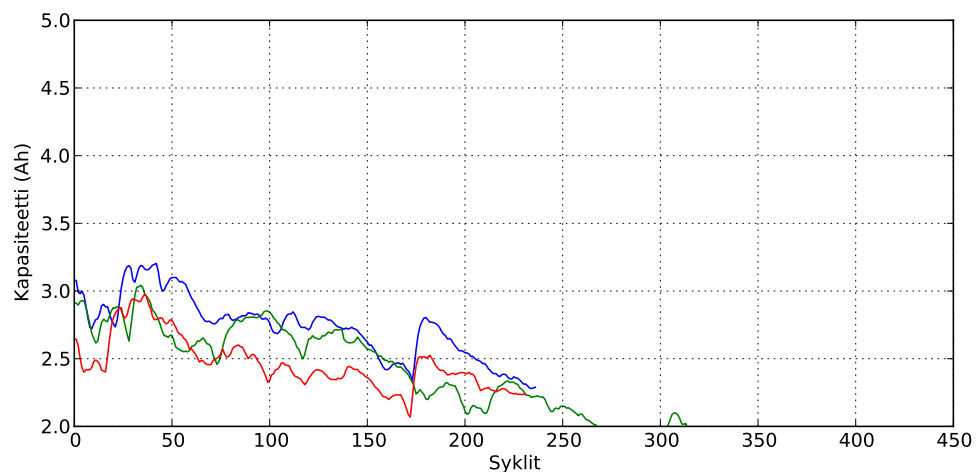
Akkujen lämpötilat ovat purkamisen lopussa pysyneet 50 °C alapuolella ja lämpenemä purun aikana on ollut keskimäärin 20 °C. Kennojen resistanssit ovat syklityksen alussa 5 mΩ . Kuten muidenkin akkujen tapauksessa joidenkin kennojen resistanssit alkavat kasvamaan syklityksen edetessä ja akkujen vanhentuessa.

Kuvassa 4.13 on esitetty Microvastin akkujen purkukapasiteetti lataus- ja purkasykliä funktiona. Akkujen nimellisen kapasiteetin olisi laskennallisesti pitänyt olla 4,4 Ah, joten akkujen alkukapasiteetti on huomattavasti odotettua pienempi. Kapasiteetti on vaihdellut suhteellisen paljon syklityksen edetessä joten, tarkkoja rajoja akun vanhenemiselle on vaikea antaa. 3 Ah:n kapasiteettiin verrattuna akkujen kapasiteetti on laskenut 20% 150, 170 ja 210 sykliin mennessä. 170 syklin kohdalla tapahtuva kapasiteetin kasvu saattaa johtua akkujen lämmityksen aloittamisesta, mutta yhteys ei ole täysin selvä ja taustalla saattaa olla myös jokin muu syy. Datasta ei kuitenkaan käy ilmi mitään itsestään selvää syytä kapasiteetin suurelle ja äkkinäiselle muutokselle.



Kuva 4.12: Gneral electronics battery LF9550150SH33C:n syklikestävyys

Akkujen lämpötila on purkamisen lopussa pysytellyt $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ alapuolella ja akkujen lämpenemät ovat olleet $20\text{ }^{\circ}\text{C}$:n tuntumassa. Kennoresistanssit ovat kennoa kohden 6 ja $8\text{ m}\Omega$ välillä. Vaikka Akkujen kapasiteetti laskee syklityksen edetessä, akkujen kennoresistanssit eivät näytä samoja vanhenemisen merkkejä kuin muut akut ovat vanhetessaan osoittaneet, vaan pysyvät keskenään samansuuruisina ja alkutilanteeseen nähden muuttumattomina.



Kuva 4.13: Microvast MV18650FP1-1:n Syklikestävyys

4.1.1 Yhteenveto mittaustuloksista

Akkuja tutkittaessa kävi ilmi, että akuissa on huomattavia valmistajakohtaisia eroja. Collection Powersources, Sanya energy, Kokam ja Shida battery technologyn akut

kestivät syklitystä yli odotusten. Näiden valmistajien akut olivat vielä toimitakuntoisia 1000 lataus-purkusyklin jälkeen. Hyvin pärjänneet akut olivat myös pääosin tasalaatuisia ja vanhenivat samassa tahdissa keskenään. Poislukien Sanyan energy jonka 3 selviytyvästä akusta yksi vanheni muita nopeammin. Testissä olleiden akkujen pienestä määrästä 4/valmistaja johtuen, akkujen tasalaatuisuudesta ei kuitenkaan voi tehdä kovin pitkälle meneviä johtopäätöksiä.

Kuormituksen lisääminen ei ole vaikuttanut akkujen elinikään oleellisesti. Akut jotka ovat kestäneet 400 mΩ kuormitus sykliä hyvin ovat myös kestäneet 275 mΩ kuormituksen. Selkeä vaikutus on nähtävissä vain General electronics batteryn ja Everwin technologyn akuissa.

Akkujen ilmoitetulla C luvulla ei näytä olevan suurtakaan vaikutusta akkujen kestävyys. Hyvin kestäneiden akkujen joukossa oli akkuja joiden C luvut olivat väliltä 20 – 30 ja 20 C:n akun (Kokam) kapasiteetti pienini hitaimmin. Valmistajakohtaisesti C luvulla näytti olevan merkitystä sillä Everwin technologyn 55 C:n akku kesti syklitystä paremmin kuin saman valmistajan 25 C:n akku.

Akkujen lämpötila ei ole vaikuttanut kestävyys merkittävästi. Akkujen lämpötila purkusyklin lopussa on ollut hyvillä akuilla 40-50 °C ja lämpenemä purkusyklin aikana 20 – 30 °C . Myös huonommin kestäneiden akkujen lämpötilat liikkuivat samoissa lukemissa. Ympäristön lämpötila on testilosuhteiden vaihtelun takia vaihdellut 5 – 30 °C välillä.

Myöskään akkujen kennoresistanssi syklityksen alussa ei ennustanut akkujen hyvyttä tai huonoutta. Hyvin kestäneen Kokamin akuilla oli hyvin pärjänneistä akuisista korkein kennoresistanssi.

Akkujen ikääntyminen näkyy kennoresistansseissa selvästi. Akkujen ikääntyessä kennoresistanssi alkaa kasvamaa ja tästä voidaan päätellä akun kennojen kuntoa.

5. LOPPUPÄÄTELMÄT

Toteutetulla järjestelmällä pystyttiin mittaamaan akkujen vanhentumista luotettavasti ja tutkittujen akkujen välillä näkyi selviä eroja syklikestävyudessa. Tutkittujen akkujen joukosta löytyi monia lupaavia kandidaatteja hitsauskoneen energianlähteeksi.

Järjestelmän luotettavuus pienillä ketjun pituuksilla on hyvä. Suuremmat mitausjärjestelyt ovat kuitenkin vaivalloisia rakentaa ja vaativat jatkuvaa vahtimista. Järjestelmän ketjutetun luonteen vuoksi, viat yhdessä kohdassa keskeyttävät koko järjestelmän toiminnan.

Luotettavuuden parantamiseksi järjestelmään vaadittaisiin melko suuria arkkitehtuurimuutoksia.

Projektin alussa listatuista tavoitteista tärkeimmät saavutettiin. Testien tuloksena pystyttiin löytämään monia laadukkaita akkuvalmistajia.

LÄHTEET

- [1] Alhonsalo Ilkka,
Litiumakut pulssimaisessa käytössä.
 Kandidaatintyö, Tampereen teknillinen yliopisto
 2011

- [2] Thomas Reddy
Linden's Handbook of Batteries
 Fourth edition
 2010
 ISBN-13: 978-0071624213

- [3] Web portaaleja joista eri akkuvalmistajia haettiin:
<http://www.alibaba.com/>
<http://www.made-in-china.com/>
<http://www.globalsources.com/>
 Viitattu 2011

- [4] Ahmad A. Pesaran, Matthew Keyser
Thermal Characteristics of Selected EV and HEV Batteries
 Annual Battery Conference: Advances and Applications
 Long Beach, California, January 9-12, 2001

- [5] MAXIM semiconductor
 MAX11068 Datasheet
<http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX11068.pdf>
 Viitattu 2012

- [6] MAXIM semiconductor
 APPLICATION NOTE 148
 Guidelines for Reliable Long Line 1-Wire® Networks
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN148.pdf>
 Viitattu 2012

- [7] HDF5 for Python
 Andrew Collette
 2008

<http://h5py.alfven.org>